

برنامه‌ریزی مسیر پهپادها در فضای سه‌بعدی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی پروانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

حکیمه مظاهری^۱، سلمان گلی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان، hakime.mazaheri@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان

چکیده

تحقیقات بسیاری در زمینه برنامه‌ریزی مسیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در پهپادها انجام شده است که با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود، نتایج مختلفی را به همراه داشته است. در این پژوهش از یک الگوریتم پیشنهادی مؤثر مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی پروانه استفاده شده که دارای یک تابع مطلوبیت و قابلیت بهینه‌سازی هم‌زمان چند پاسخ است. وجه تمایز BOA نسبت به سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری آن است که هر پروانه با ترکیب اطلاعات به‌دست‌آمده از گیرنده‌های مختلف حسی، برازش منحصر به خود را در مسیر تولید کرده و از این جهت توانایی خوبی در حل مسائل چندهدفه دارد. در این نوشتار از یک تابع هدف سه‌بعدی به‌منظور محاسبه طول کوتاه‌ترین مسیر، شدت برخورد با موانع، جلوگیری از تصادم و افزایش توان عملیاتی پهپاد که تابعی از میزان انرژی مصرف شده است، استفاده خواهد شد. همچنین مفهوم عامل پرتاب هوشمند استفاده‌شده در این الگوریتم هم‌زمان باعث جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی و افزایش سطح پوشش شبکه در فرایند مسیریابی می‌شود. این عامل پرتاب با استفاده از تکنیک‌های هندسی و منحنی میزان، مانع از برخورد پهپاد با موانع می‌شود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با روش‌های کلونی مورچه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌عنوان کاربردی‌ترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، الگوریتم BOA در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، در بهترین حالت، دارای کمترین هزینه و در بدترین حالت، دومین کمترین هزینه را داشته است. همچنین BOA از نظر مدت‌زمان اجرا و مقدار بهینه تابع برازش، به نسبت دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، برنامه‌ریزی مسیر، الگوریتم بهینه‌سازی پروانه، فضای سه‌بعدی، جلوگیری از تصادم

UAV path planning based on butterfly optimization algorithm in three-dimensional space

Hakimeh Mazaheri¹, Salman Goli²

1- PhD student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Kashan University hakime.mazaheri@gmail.com

2- Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Kashan University Salmangoli@gmail.com

Abstract

Much studied have addressed Path planning as one of the main topics in unmanned aerial vehicles; which has yielded different results due to the existing conditions and limitations. To this end, the present study proposed an efficient algorithm underpinned by the propeller optimization algorithm, which had a utility function and could optimize multiple responses simultaneously. BOA is different from other meta-heuristic algorithms as each propeller produces its own unique fit in the path by combining information extracted from different sensory receptors. Accordingly, BOA can solve multi-objective problems. A 3D objective function was used in this study to estimate the length of the shortest path and the intensity of collisions with obstacles, avoid collisions and enhance UAVs' operational capacity as a function of consumed energy. Furthermore, A smart launcher factor was also included in this algorithm to prevent trapping in local optimizations and promote network coverage in the routing process at the same time. The launcher prevents collision with obstacles in UAVs by adopting geometric techniques and the contour line. The performance of the proposed algorithm was compared with that of the most practical meta-heuristic algorithms (namely ACO and PSO methods). The findings revealed that the BOA algorithm compared to the other two algorithms had the lowest cost and the second lowest cost under the best and worst conditions, respectively. The findings also confirmed the better performance of BOA than the other two algorithms regarding execution time and the optimal value of the fit function.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Path Planning, Butterfly Optimization Algorithm, 3 Dimension collision avoidance.

۱۸۹

سال ۱۰- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و

فناوری هوا فضا



است. در ادامه به بررسی مهم‌ترین چالش‌ها پرداخته می‌شود.

مصرف انرژی. پهپادها با محدودیت‌های ذخیره‌سازی انرژی مواجه هستند درحالی‌که در شبکه‌های بین خودروبی^۱ می‌توان از باتری اتومبیل که در هنگام حرکت اتومبیل شارژ می‌شود، انرژی گرفت. شبکه‌های بین خودروبی متحرک، معمولاً منبع تغذیه‌ای دارند که تا چند ساعت انرژی ذخیره می‌کند. پهپادهای کوچک ممکن است برای پرواز به مدت ۳۰ دقیقه، قدرت داشته باشند

تحرک. میزان تحرک پهپادها به کاربرد بستگی دارد. برای مثال، پهپادها هنگام برقراری ارتباط در منطقه زلزله‌زده، روی منطقه شناور می‌شوند و پیوند بین آن‌ها پویا ولی با سرعت پایین ایجاد می‌شود. بر خلاف این، در برنامه‌هایی مانند کشاورزی یا نظارت بر جنگل‌ها پهپادها در یک منطقه بزرگ با پویایی کمتر و سرعت بالاتر حرکت می‌کنند. مصرف انرژی در این کاربردها با یکدیگر متفاوت است.

خودمختاری و جلوگیری از تصادم. خودمختاری یا استقلال، مکانیسمی است که در آن پهپادها می‌توانند با استفاده از اطلاعات موجود، در مورد راه‌های حل مسئله به‌تنهایی تصمیم‌گیری کنند. اطلاعات جمع‌آوری شده از محیط، توسط حسگرها، دوربین‌ها یا سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۲ قابل ثبت است. این امر کارایی پهپادها را افزایش می‌دهد [۱۱]. اما مسئله جلوگیری از تصادم، به دلیل توپولوژی پویا، توزیع ناهمگن و عبور از موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و مسیرهای پرازدحام، یک مسئله چالش‌برانگیز در این زمینه محسوب می‌شود [۱۲]. پهپادها

توسعه سریع رابط‌های رادیویی کم‌هزینه، سیستم موقعیت‌یاب جهانی و میکروکمپیوتورها باعث شده پهپادها پتانسیل عظیمی در کاربردهای مختلفی مانند امداد رسانی [۱]، نظارت و شناسایی [۲]، نظارت بر مرزها [۳]، ردیابی [۴]، مدیریت آتش‌سوزی [۵]، نظارت و مدیریت بر حوادث ترافیکی [۶]، تحویل کالا [۷] و تقویت-کننده‌های ارتباطی [۸] که هدف در آن‌ها تسهیل و افزایش امنیت زندگی انسان است داشته باشند. استفاده از پهپادها بیش از ۲۵ سال قدمت دارد برای مثال در ادارات دولتی مانند پلیس، آتش-نشانی، شهرداری و مدیریت حمل‌ونقل پهپادها می‌توانند در عملیات امنیتی و سوانح، هشدارهای ضروری را به‌موقع اعلام کنند و در حین بلایای طبیعی مثل سیل و زلزله در عملیات امداد و نجات زمانی که شبکه ارتباطی یا زیرساخت شهری فلج شده است به تسریع ارتباطات کمک کنند.

پهپادها به دلیل چابکی، مقرون‌به‌صرفه بودن و قابلیت مانور بالا سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در زمینه‌های مختلف به خود اختصاص داده‌اند و فرصتی مناسب برای بازار تولیدکنندگان تجهیزات و ارائه‌دهندگان خدمات تجاری فراهم می‌کنند [۹].

مطابق گزارش PwC ارزش بازار قابل‌استفاده از پهپادها بیش از ۱۲۷ میلیارد دلار است و با استفاده در زیرساخت‌های عمرانی پیش‌بینی می‌شود تا ۴۵ میلیارد دلار افزایش یابد [۱۰]. در این بین انتظار می‌رود که فروش پهپادها در سال ۲۰۲۱ به ۱۲ میلیارد دلار برسد. پهپادها علی‌رغم مزایای بسیار، با چالش‌هایی نیز همراه هستند. میزان اهمیت و حساسیت هریک از چالش‌ها بر اساس کاربرد و نوع شبکه متفاوت



1- Vehicular Ad Hoc Network

2- Global Positioning System(GPS)

به خودی خود قادر به پیدا کردن راه حل نیستند [۱۳]. بنابراین، برای انجام عملیات‌های مختلف باید توانایی حل مسئله و پیدا کردن راه حل توسط خود پهپاد وجود داشته و خودمختار باشند. [۱۴].

برنامه‌ریزی مسیر. یکی از چالش‌های استفاده از پهپادها برنامه‌ریزی مسیر است زیرا سرعت تغییرات در شبکه پهپادی بالا است. تحرک سریع و توزیع ناهمگن پهپادها ممکن است احتمال بروز تصادم و ازدحام پهپادها را در طول مسیر افزایش دهد. این مسئله اهمیت یافتن مسیری بهینه از منبع به مقصد با وجود موانع متعدد را دوچندان می‌کند [۱۳]. در این بین برنامه‌ریزی مسیر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای تعیین اهداف، ارتفاع مناسب پروازی و یافتن مسیر پهپاد پیشنهاد شده است [۱۳]. به این منظور تاکنون تعدادی از روش‌های برنامه‌ریزی مسیر مانند مدل‌های احتمالی، مدل‌های تکاملی [۱۴] زمینه‌های بالقوه^۳ [۱۵]، تجزیه سلول [۱۶]، نقشه راه [۱۷] و الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی گراف استفاده شده‌اند [۱۸].

تمرکز این پژوهش بر ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی در زمینه برنامه‌ریزی مسیر به‌گونه‌ای است که پارامترهای هدف از جمله تولید مسیر نزدیک به بهینه، عدم تصادم و کاهش مصرف انرژی در این چالش را بهبود بخشد. به صورت کلی نوآوری‌های روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- تولید نقاطی بین مبدأ تا مقصد جهت دور زدن موانع و کاهش چرخش‌های ناگهانی و شدت مانور؛
- استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر پهپادها با قابلیت بهینه‌سازی اهدافی مانند طول مسیر، هزینه، عدم

برخورد و کاهش مصرف انرژی.

در ادامه، در قسمت دوم، بیان مسئله در قالب فازهای برنامه‌ریزی مسیر معرفی خواهند شد. در قسمت سوم پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بررسی شده و بر اساس نوع راه حل و کاربرد دسته‌بندی می‌شوند. در قسمت چهارم ابتدا الگوریتم BOA معرفی شده و سپس الگوریتم پیشنهادی بر اساس آن ارائه می‌شود. در قسمت پنجم نتایج آزمایش‌ها و مقایسه با سایر الگوریتم‌های موجود انجام می‌شود و در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی بیان خواهد شد.

۲. بیان مسئله

در حالت کلی برای حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر، فضای مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود. **تعریف ۱:** محیط کاری W ، یک فضای فیزیکی است که با \mathbb{R}^2 برای فضاهای مسطح (۲ بعدی) یا \mathbb{R}^3 برای فضاهای سه‌بعدی نشان داده می‌شود. **تعریف ۲:** یک مانع، بخشی از محیط کاری W است که به طور دائم اشغال شده و با نماد O_i نشان داده می‌شود به گونه‌ای که:

$$\{O_i \in W | i = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

تعریف ۳: پهپاد، شامل یک یا چند بدنه محکم است که محدودیت در حرکت دارند و با نماد U که نشان‌دهنده ناحیه اشغال شده توسط حجم پهپاد است نشان داده می‌شود و $U \in W$ است.

تعریف ۴: پیکربندی پهپاد، به مجموعه پارامترهایی مانند سرعت، زاویه حرکت و ارتفاع پهپاد گفته می‌شود که وضعیت پهپاد U را در یک لحظه و موقعیت مشخص s به طور کامل مشخص می‌کند و با q نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر s تابعی از زمان و مکان پهپاد است. بنابراین $U(q_s)$ ناحیه‌ای از W است که با پهپاد U در پیکربندی q در لحظه و موقعیت مشخص s اشغال





شده است. ترکیب‌های مختلف پارامتر q نشان‌دهنده درجه‌های آزادی متفاوت پهپاد است. فضای کاری به سه قسمت فضای اشغال‌شده توسط پهپاد، فضای اشغال‌شده توسط مانع و فضای پیکربندی آزاد تقسیم می‌شود.

تعریف ۵: فضای پیکربندی C برای پهپاد U مجموعه‌ای از تمام پیکربندی‌های U در W است که به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$C = \{\forall q_s | U(q_s) \subseteq W\} \quad (۲)$$

تعریف ۶: موانع فضای پیکربندی، نگاشتی از موانع در فضای کاری به فضای پیکربندی است که با CO نشان داده می‌شود و مجموعه‌ای از تمام پیکربندی‌هایی است که پهپاد در آنجا با موانع برخورد دارد.

$$CO = \{all q_s, O_i | U(q_s) \cap O_i \neq \emptyset\} \quad (۳)$$

تعریف ۷: فضای پیکربندی آزاد C_{free} ، مجموعه پیکربندی‌هایی است که در آن پهپاد برخوردی با موانع فضای کاری ندارد یا به عبارتی:

$$C_{free} = \{all q_s, O_i | U(q_s) \cap O_i = \emptyset\} \quad (۴)$$

تعریف ۸: جستجوی محلی از یک راه‌حل پیش رو آغاز می‌شود و سپس به صورت مکرر به راه‌حل مجاور حرکت می‌کند و تنها زمانی امکان‌پذیر است که روابط همسایه‌ای و مجاورت در فضای جستجوی مسئله تعریف شده باشد. نتیجه جستجوی محلی تولید مسیر محلی است. مسیر محلی، تابع پیوسته‌ای است که در رابطه (۵) با $lp_i(q_s, q'_s)$ نشان‌دهنده i امین مسیر محلی، q_s پیکربندی پهپاد در نقطه ابتدایی مسیر محلی و q'_s پیکربندی پهپاد در نقطه انتهایی و n تعداد نقاط در مسیر محلی است. اگر مسیر محلی با $lp_i(q_s, q'_s)$ تعریف شود، آنگاه:

$$lp_i(q_s, q'_s) = \sum_{i=1}^n lp(i, i+1), 1 \leq i \leq n, [q_s, q'_s] \subseteq C \quad (۵)$$

تعریف ۹: تعریف مسیر سراسری مانند همان تعریف مسیر محلی است با این تفاوت که پیکربندی پهپاد در نقاط ابتدایی و انتهایی در قالب $Gp(q_{start}, q_{end})$ نمایش داده می‌شود. با توجه به جستجوی گسسته‌ای که استفاده می‌شود، Gp به‌عنوان مجموعه‌ای مرتب از k مسیر محلی $Gp(lp_1, \dots, lp_k)$ تعریف می‌شود و این به یک مسیر پیوسته منجر می‌شود که پارامتر k تعداد نقاط میانی است و Gp_k یک مسیر سراسری با k نقطه میانی است.

$$Gp_k(q_{start}, q_{end}) = \sum_{\substack{i=1 \\ \leq i \leq k}}^k lp(i, i+1), 1 \quad (۶)$$

برنامه‌ریزی مسیر شامل دو فاز است. فاز اول پیش‌پردازشی است که بر اساس مساحت محیط تحت پوشش و موقعیت موانع، انجام می‌شود. فاز دوم، جستجوی مسیر است که از بین مسیرهای موجود بهترین مسیر انتخاب می‌شود. در ادامه این دو فاز معرفی می‌شوند.

۲-۱. فاز طراحی محیط

اولین فاز از برنامه‌ریزی مسیر مرحله طراحی محیط است. مأموریت‌های پهپاد بر اساس توپوگرافی سه‌بعدی و پیچیده طراحی می‌شوند. توپوگرافی، نقشه‌ای است که برای نمایاندن ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین به کار می‌رود و عاملی کلیدی در طراحی محیط‌های پیچیده است. برای شبیه‌سازی موانع در توپوگرافی‌های پیچیده از منحنی میزان استفاده می‌شود. این منحنی همهٔ نقاط هم‌ارتفاع زمین را به هم وصل می‌کند. منحنی‌های میزان^۴ همدیگر را قطع نمی‌کند و کوچک‌ترین محیط بسته در این نقشه‌ها، بلندترین یا پایین‌ترین نقطه می‌باشد.

4- contour line

پاره‌خط با مانع مخروطی تصادم نداشته باشد آن مسیر امن است.

$$\frac{x - x_1}{a} = \frac{y - y_1}{b} = \frac{z - z_1}{c} = t \quad (8)$$

در رابطه (۸)، پارامترهای a, b, c جهت‌های محور مختصات در فضای سه‌بعدی هستند. از آنجایی که عدم برخورد با موانع و پیمایش مسیر با کمترین طول از پارامترهای تأثیرگذار است تمرکز این پژوهش در ارائه الگوریتمی فرا ابتکاری، به‌عنوان راه‌حلی در برآورد مسائل ترکیبی و چندهدفه است.

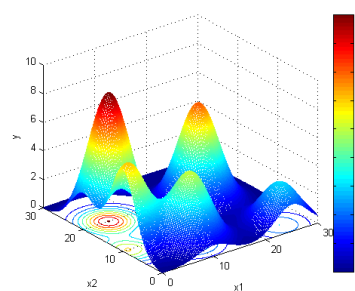
۲-۲. فاز جستجوی مسیر

محدودیت‌های موجود در پهپادها از جمله برخورد با یکدیگر و موانع، محدودیت‌های مانور و حمل بار، شرایط خارجی محیط و غیره باعث سخت شدن طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر موجود می‌شود. همچنین به دلیل پیشرفت گسترده کاربردهای پهپادها در حوزه‌های مختلف ممکن است الگوریتم‌های قبلی کارایی خود را از دست داده یا مطلوب نباشند. بنابراین، تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی برای محاصره و کاوش پهپادها با اشیای پیچیده و در یک محیط پیچیده مورد نیاز هستند. تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر پهپادها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول تکنیک‌های مبتنی بر نمونه‌برداری هستند که در فاز پیش‌پردازش و طراحی محیط استفاده می‌شوند و دارای سه رویکرد تجزیه سلول^۵ [۲۰]، نقشه راه^۶ [۲۱] [۲۲] و زمینه‌های بالقوه^۷ [۲۳] [۲۴] هستند. دسته دوم تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است که در فاز جستجو استفاده می‌شوند و دارای رویکردهایی مانند جستجوی فرا

بنابراین استفاده از منحنی‌های میزان در نقشه‌های توپوگرافی می‌تواند موقعیت کلی مانع را مشخص کند. در این پژوهش از یک تابع توزیع نرمال برای شبیه‌سازی موانع مخروطی استفاده می‌شود. توپوگرافی استفاده‌شده در این مقاله بر مبنای مدل پیشنهادی در [۱۹] است. در رابطه (۷)، h_i حداکثر ارتفاع کوه و a_i و b_i مختصات موقعیت مرکزی کوه‌ها هستند. z_i مدل توپوگرافی در توزیع نرمال مانع i ام و Z مدل توپوگرافی در توزیع نرمال استاندارد است. ضمن اینکه میزان انحراف از معیار نیز به‌صورت پیش‌فرض ۲۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ مدل‌های توپوگرافی موانع به همراه منحنی میزان در یک سیستم مختصات سه‌بعدی نشان داده شده است.

$$z_i(x, y) = h_i \times e^{-\frac{(x-a_i)^2}{20} - \frac{(y-b_i)^2}{20}} \quad (7)$$

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{\mu} h_i \times e^{-\frac{(x-a_i)^2}{20} - \frac{(y-b_i)^2}{20}}$$



شکل ۱- مدل توپوگرافی پنج کوه به همراه منحنی میزان در محیط سه بعدی

برای محاسبه وجود یا عدم وجود برخورد و شدت آن با موانع مخروطی، با استفاده از معادله خط در فضای سه‌بعدی، مختصات x, y و z تعدادی از نقاط روی پاره‌خط به دست آمده و به ازای مختصات x و y هر یک از نقاط، رابطه (۷) محاسبه خواهد شد. سپس در صورتی که اندازه Z هر نقطه از مقدار Z به دست آمده از رابطه (۷) کمتر یا مساوی باشد به معنای ایجاد تصادم است. در غیر این صورت اگر هیچ‌یک از نقاط روی یک





ابتکاری با الهام از طبیعت یا بدون الهام از طبیعت با الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، مدل‌های تکاملی، روش تبرید شبیه‌سازی‌شده^۸ و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^۹ است [۲۵] [۲۶]. بر این اساس، در این پژوهش و در فاز جستجوی مسیر از الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که عملکرد بهتری نسبت به رویکردهای سنتی داشته‌اند [۲۷]. در ادامه الگوریتم‌های کاربردی در زمینه برنامه‌ریزی مسیر بررسی خواهد شد.

۳. پیشینه پژوهش

برنامه‌ریزی مسیر پهپاد در یک فضای سه‌بعدی و پیچیده انجام می‌شود بنابراین روش‌های برنامه‌ریزی ساده مسیر دوبعدی قادر به یافتن موانع و مقایسه با آن نیستند و به تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی جدیدی برای پیمایش پهپادها با اشیای پیچیده و در یک محیط پیچیده نیاز است. همان‌طور که بیان شد الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان کاندیدای اصلی برای حل مؤثر مسائل برنامه‌ریزی مسیر و ارائه راه‌حل‌های ممکن در مدت‌زمان کوتاه استفاده شده است. در ادامه پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه بررسی می‌شوند.

۳-۱. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه

الگوریتم کلونی مورچه الهام گرفته از مطالعات و مشاهدات روی کلونی مورچه‌هاست. این الگوریتم بیانگر نوعی هوشمندی جمعی است. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها یکی از روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر پهپادها است [۲۷]. در [۲۸] نسخه‌ای از این الگوریتم ارائه شده است که یک الگوی محیطی قبل از برنامه‌ریزی مسیر ایجاد می‌کند. سپس بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده از محیط، حرکت بعدی در

مسیر را با یک استراتژی انتخاب تعیین می‌کند. کلونی مورچه‌ها دارای قابلیت ذخیره مسیر است و اطلاعاتی نیز در مورد فضای مسئله دارد [۲۹]. در کلونی مورچه‌های مصنوعی ویژگی‌های جدیدی از جمله بهینه‌سازی محلی، دانش قبلی، پیش‌بینی آینده و روش‌های جستجو اضافه شده است.

۳-۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۰}

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی دیگر از الگوریتم‌های کاربردی در طراحی و برنامه‌ریزی مسیر است که از تکنیک بهینه‌سازی سراسری تصادفی مبتنی بر جمعیت استفاده می‌کند [۱۳]. در PSO، دسته‌ای از ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند. هر ذره نمایانگر یک مسیر کاندید است و به ازای هر ذره، پنج خاصیت موقعیت، تابع هدف متناظر با موقعیت، سرعت، بهترین موقعیت تجربه شده و مقدار تابع هدف متناظر با بهترین موقعیت تجربه شده تنظیم می‌شود. ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند تا با به‌روزرسانی موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود و ذرات مجاور آن، مسیر بهینه را پیدا کنند. در این حالت، از مبدأ به سمت بهترین موقعیت تجربه‌شده یک بردار ترسیم می‌شود. بهترین موقعیت قبلی یک ذره به‌عنوان مسیر محلی ثبت می‌شود و بهترین موقعیتی که توسط ازدحام به دست آمده است بهترین مسیر سراسری نامیده می‌شود. PSO با به‌روزرسانی موقعیت و سرعت هر ذره، راه‌حل‌های بهینه را جستجو می‌کند [۳۰].

۳-۲. الگوریتم پروانه

پروانه‌ها از حس بویایی، بینایی، چشایی، لامسه و شنوایی خود برای یافتن غذا استفاده می‌کنند. در بین تمامی حواس پروانه‌ها، حس بویایی مهم‌ترین حس است. از نظر بیولوژیکی یک

8- Simulated Annealing(SA)

9- Ant Colony Optimization (ACO)

10- Particle Swarm Optimization(PSO)

پروانه عطر و بویی با شدت مشخص ایجاد می‌کند که با برازش^{۱۱} آن ارتباط دارد. این عطر از راه دور پخش می‌شود و پروانه‌های دیگر می‌توانند آن را حس کنند. هنگامی که یک پروانه قادر به احساس رایحه از هر پروانه دیگری باشد به سمت آن حرکت می‌کند به این مرحله جستجوی سراسری می‌گویند. اگر پروانه‌ای رایحه‌ای اطراف خود احساس نکند به صورت تصادفی حرکت می‌کند که به این مرحله نیز جستجوی محلی گفته می‌شود. در الگوریتم بهینه‌سازی پروانه، هر پروانه، برازش منحصر به فرد خود را دارد و این موضوع مهم‌ترین دلیل تمایز الگوریتم پروانه نسبت به سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری است.

همان‌طور که گفته شد از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، مانند الگوریتم ژنتیک (GA) [۳۶، ۳۷] و الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACA) [۳۸، ۳۹] در فاز جستجوی مسیر استفاده می‌کنند. اولی قدرت مانور خوبی در جستجوی سراسری دارد و می‌تواند به سرعت همه راه‌حل‌ها را بدون افتادن در بهینه محلی پیدا کند [۴۰]. مورد دوم در جستجوی راه‌حل بهتر، قوی است [۳۸] و نتایج تجربی آن امکان حل مشکل را فراهم می‌کند. با این حال، این الگوریتم‌ها محدودیت‌های مشترکی دارند که به سختی می‌توان از آن‌ها در حل مسائل برنامه‌ریزی مسیر پهباد در مقیاس بزرگ استفاده کرد. به عنوان مثال، الگوریتم ژنتیک برای جستجوی سطحی در تکرارهای زیاد و با کارایی کم، ضعیف است و به سرعت به همگرایی می‌رسد [۳۶]. الگوریتم کلونی مورچه به پارامترهای اولیه حساس است و با تنظیم نامناسب، میزان جستجو را کاهش می‌دهد و نتایج ضعیفی به دست می‌آورد [۳۸]. با توجه به اینکه در BOA هر

پروانه رایحه منحصر به فرد خود را دارد که از طریق گیرنده‌های حسی مختلف دریافت می‌شود [۱۶] می‌توان از این قابلیت در حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر پهباد با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بهره برد. در این پژوهش الگوریتم BOA با تمرکز بر اهدافی مانند کاهش طول مسیر، هزینه مسیر و جلوگیری از تصادم با مانع ارائه شده است.

۴. روش پیشنهادی

بیشتر الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر مناسب فضای دوبعدی و کاربردهای رباتیک هستند که قابلیت استفاده مستقیم در فضای سه‌بعدی را ندارند. هدف از این پژوهش ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری برای برنامه‌ریزی مسیر پهبادها در فضای سه‌بعدی و به گونه‌ای است که ضمن پیمایش یک مسیر کمینه و کاهش مصرف انرژی، عاری از تصادم یا برخورد با موانع موجود در مسیر باشد. در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نقاط میانی تولیدشده، تعداد مانورهای پهباد کاهش داده می‌شود تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود و از افتادن در بهینه محلی جلوگیری گردد. سپس کارایی روش پیشنهادی با دو الگوریتم فرا ابتکاری کلونی مورچه و بهینه‌سازی ذرات که در این زمینه رایج‌تر است مقایسه می‌شود [۲۷]. بدین منظور الگوریتم‌های مذکور در حالت‌های فضای دوبعدی و سه‌بعدی با موانعی که به اشکال هندسی ساده مانند دایره و مخروط مدل شده‌اند از لحاظ میزان هزینه مسیر مقایسه خواهند شد. اساس روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب الگوریتم BOA با یک عامل پرتاب هوشمند بوده و تابع برازش آن بر اساس میزان مسافت طی شده، توان عملیاتی پهباد و تعداد برخوردهای با موانع محاسبه می‌شود. استفاده از عامل هوشمند در این الگوریتم باعث تولید نقاط میانی در طول مسیر می‌شود که تعداد مانورهای موجود در مسیر و

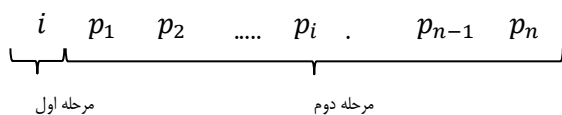


مصرف انرژی را کاهش می‌دهند. شبه کد مربوط به الگوریتم پیشنهادی شامل تعریف تابع برازش و تابع اجتناب از تصادم در ضمیمه مقاله آورده شده است.

۴-۱. فاز جستجو: عامل پرتاب هوشمند

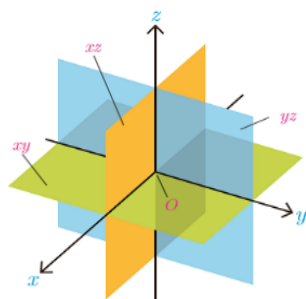
در این پژوهش برای اولین بار با توسعه الگوریتم بهینه‌سازی پروانه از این الگوریتم، برای حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر استفاده شده است. این الگوریتم دارای دو فاز جستجوی سراسری و محلی است. برای انتخاب بهینه سراسری و جلوگیری از افتادن در بهینه محلی نیاز به ناظری وجود دارد که به صورت هوشمندانه بر اساس برازش مسیر تصمیم‌گیری کند. این عامل هوشمند به گونه‌ای طراحی شده که نقاط نادرست را حذف کرده و در صورت لزوم باعث پرتاب شود. این عامل هوشمند، یک عامل مجازی کمک‌کننده به پهپاد در برازش و انتخاب مسیر است که باعث جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی و افزایش سطح پوشش شبکه در فرایند مسیریابی می‌شود. بنابراین در مرحله اول، مقادیر بهینه پارامترهایی مانند اندازه جمعیت، حداکثر تعداد تکرار، تعداد پروانه‌ها و تعداد نمونه‌ها در هر تکرار با روش حریصانه به دست می‌آید. سپس نقاط اولیه تصادفی و با توزیع یکنواخت در محیط پخش می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از این عامل، تعدادی نقطه میانی بین مبدأ و مقصد تولید می‌شود و در هر گام، هدایت پهپاد به سمت موقعیت‌های جدید بر اساس برازش مسیر و پارامتر step انجام می‌شود. در تابع پرتاب، حداکثر طول هر عامل برابر با n است. در گام‌های ابتدایی پارامتر step مقدار کمتری دارد اما تعداد نقاط بیشتری را باید بررسی کند بنابراین تابع پرتاب طول n را دارد و با یک دید سراسری مسیر را طراحی می‌کند. اگر مسیر برازش مناسبی نداشت

چون مقدار Step کوچک است کمتر جریمه می‌شود اما هرچه به گام‌های انتهایی نزدیک‌تر می‌شود به دلیل اینکه نقاط کمتری پیش‌رو دارد انتظار می‌رود مسیر مناسب‌تری انتخاب شود بنابراین انتخاب مسیر اشتباه جریمه سنگین‌تری در پی خواهد داشت در این حالت i و p_i توسط BOA تعیین می‌شود.



با توجه به موارد ذکر شده پرتاب هوشمند بر اساس فضای مسئله طبق مراحل زیر تعریف می‌شود.

- (a) تعیین نقطه میانی موردنظر برای پرتاب؛
- (b) تعیین طول و جهت پرتاب (اندازه پرتاب)؛
- (c) انتقال از ناحیه $\{1-8\}$ به نقطه با جواب بهینه (شکل ۲).



شکل ۲- نواحی موردنظر برای پرتاب هوشمند

استفاده از عامل پرتاب هوشمند در مراحل تعیین مسیر الگوریتم BOA، دو مزیت دارد. اول اینکه این نقاط به صورت تصادفی و در محدوده وسیع و مشخصی از مساحت محیط، تولید می‌شوند لذا در بهینه محلی گیر نمی‌کنند. از طرفی به دلیل اینکه این نقاط، طول متغیر دارند الگوریتم با محاسبه طول و جهت پرتاب، انتقال پهپادها را در فضای وسیع‌تری انجام می‌دهد تا به بهینه سراسری نزدیک‌تر شود. شکل ۲ جهت‌های

موردنظر برای انتقال در هر گام را به منظور بهبود جستجوی سراسری نشان می‌دهد.

۴-۲. فاز جستجو: محاسبه تابع برازش

الگوریتم دارای سه مرحله مقداردهی اولیه، تکرار و مرحله نهایی است. ابتدا، مقداردهی اولیه انجام می‌شود، سپس جستجو به صورت تکراری انجام می‌شود و اگر بهترین راه‌حل پیدا شود الگوریتم پایان می‌یابد.

- تعریف تابع هدف و فضای راه‌حل مسئله و مقادیر پارامترها؛
- تعیین تعداد پروانه‌های اولیه (تعداد کل آن‌ها ثابت است)؛
- تعیین موقعیت پروانه‌ها و ذخیره میزان عطر و برزاش آن‌ها؛
- ایجاد پروانه‌های مصنوعی و آغاز جستجو.

در این پژوهش، کاهش طول مسیر، مصرف انرژی، هزینه مسیر و اجتناب از برخورد پهپاد با مانع از پارامترهای مؤثر در محاسبه تابع برازش هستند. لذا در این بخش و در ادامه به معرفی روابط مربوط به محاسبه این اهداف پرداخته می‌شود.

$$d(x, y) = \sqrt{(x - y)^2} \quad (9)$$

$$pl = \begin{cases} \sum_{i=1}^{L-1} pl_{i-1} + d(p_i, p_{i+1}) & , if \\ 0 & , o.w \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه (۹) $d(x, y)$ فاصله اقلیدسی از موقعیت فعلی پهپاد تا نقطه میانی در فضای مسئله و برحسب متر است. همچنین در رابطه (۱۰) پارامتر L تعداد نقاط میانی است که بین نقطه مبدأ تا مقصد قرار می‌گیرند. در مرحله اول فاصله بین نقطه مبدأ تا اولین نقطه میانی محاسبه می‌شود. تا زمانی که نقطه میانی وجود

داشته باشد الگوریتم باید تمام مسیرهای موجود بین پهپاد تا آن نقطه میانی را محاسبه کند و بهترین تصمیم را بگیرد. سپس، مسیرهای پیش روی عامل بررسی شده و مسیرهایی که طولانی‌تر از توان عملیاتی پهپاد باشند جریمه می‌شوند تا با اولویت کمتری انتخاب شوند. با فرض داشتن توان عملیاتی، رابطه (۱۱) نحوه انتخاب نقاط میانی و موقعیت‌های جدید پهپاد را بر اساس فاصله و توان عملیاتی^{۱۲} هر پهپاد نشان می‌دهد.

(۱۱)

$$e = \begin{cases} \sum_{i=1}^{L-1} e_{i-1} + 1 - (d(p_i, p_{i+1}) - OP_i), & if \ d > OP \\ 1 & , o.w \end{cases}$$

در رابطه (۱۱) OP توان عملیاتی پهپاد برحسب میزان مسافتی است که می‌تواند طی کند و با واحد متر اندازه‌گیری می‌شود. اگر فاصله بین پهپاد تا نقطه بعدی بیشتر از توان عملیاتی پهپاد باشد به این مسیر یک مقدار منفی به‌عنوان جریمه اضافه می‌شود. بنابراین مسافت‌هایی که بیش از توان عملیاتی پهپاد باشند انتخاب نخواهند شد. پس از یافتن موقعیت جدید بعدی بر اساس پارامترهای فاصله و توان عملیاتی می‌بایست کیفیت مسیر از لحاظ تعداد موانع موجود در مسیر و شدت برخورد ارزیابی شود. از دو الگوریتم مختلف برای محاسبه تصادم استفاده می‌شود. ابتدا تصادم^{۱۳} در موانع کروی محاسبه خواهد شد بنابراین در مرحله اول می‌بایست طول تصادم موجود در مسیر محاسبه شود و بر اساس آن کیفیت مسیر اندازه‌گیری شود. بدین منظور الگوریتم با استفاده از رابطه (۱۲) ابتدا فاصله پاره‌خط ایجادشده بین موقعیت فعلی (v_1) و موقعیت جدید (v_2) با مرکز موانع موجود در مسیر را بر اساس معادله فاصله نقطه از خط^{۱۴}

12- Operational Power

13- Collision Length

14- Point to Line Distance





محاسبه می‌کند اگر فاصله مرکز مانع تا پاره‌خط کمتر از شعاع مانع باشد به این معنی است که همه یا قسمتی از مسیر محاسبه‌شده با آن مانع تصادم خواهد داشت بنابراین این فاصله به طول تصادم محاسبه‌شده در مسیر اضافه خواهد شد و به تعداد تصادم‌های مسیر یک واحد اضافه خواهد شد. در غیر این صورت این مسیر از لحاظ تعداد و طول تصادم صفر خواهد بود. تابع $CROSS$ ضرب خارجی بین a, b را محاسبه می‌کند و $d_{ptl}(pt, v_1, v_2)$ تابع محاسبه فاصله بین یک نقطه از یک پاره‌خط است که در اینجا فاصله بین پاره‌خط v_1, v_2 تا مرکز موانع را به ترتیب محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} a &= v_1 - v_2 \\ b &= pt - v_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$d_{ptl}(pt, a, b) = \frac{|cross(a, b, 2)|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$C_i = \begin{cases} \sum_{l=1}^{L_i} C_{i-1} + 1 + d(cnt_i, d_{ptl(i)}), & \text{if } d_{ptl(i)} < o_r \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases} \quad (13)$$

تعداد و شدت برخورد عامل با مانع محاسبه می‌شود که در رابطه (۱۳) بیان شده است. در رابطه (۱۳) متغیر o_r شعاع مانع است و تابع $d(cnt_i, d_{ptl(i)})$ فاصله اقلیدسی بین d_{ptl} تا مرکز موانع است. در صورتی که Dis_{ptl} بیشتر از اندازه شعاع موانع باشد همه یا قسمتی از مسیر با مانع تصادم دارد. پس از محاسبه تصادم در موانع هوایی باید میزان تصادم در موانع زمینی که به شکل مخروطی هستند محاسبه شود. بدین منظور، با استفاده از معادله خط در فضای سه‌بعدی از نقطه شروع تا نقطه میانی اول یک پاره‌خط رسم می‌شود که مسیر در گام اول است. سپس به ازای تمام نقاط روی این پاره‌خط، وجود یا عدم وجود تصادم بررسی و طول برخورد به دست می‌آید. اگر $p_0(x, y, z)$ و $p_1(x, y, z)$ مختصات نقطه مبدأ و اولین نقطه میانی باشد تابع $vec(p_0, p_1, t)$ تمام نقاط بین دو رأس با

فاصله t را محاسبه می‌کند و مختصات هر نقطه را به‌عنوان خروجی برمی‌گرداند. متغیرهای Z و Z_{out} به ترتیب، ارتفاع پهپاد در نقطه میانی مشخص و ارتفاع مانع را نشان می‌دهد. متغیر f وجود یا عدم وجود تصادم را نشان می‌دهد. معیار وجود تصادم بر اساس مدل‌سازی توپوگرافی رابطه (۷) محاسبه می‌گردد. رابطه (۱۴) طول تصادم در موانع مخروطی را محاسبه می‌کند. بر اساس این رابطه اگر ارتفاع پهپاد در نقطه اول کمتر از ارتفاع مانع باشد و متغیر f نیز برابر با صفر باشد در لحظه اول تصادم وجود دارد و مختصات این نقطه به‌عنوان اولین نقطه شروع تصادم ثبت می‌شود. به ازای تمام نقاط بعدی که متغیر f در آن‌ها برابر با یک است و ارتفاعشان از ارتفاع مانع کمتر است (داخل مانع هستند) به طول تصادم اضافه خواهد شد. این روال ادامه دارد تا ارتفاع پهپاد از ارتفاع مانع بیشتر شود و تصادمی در آن قسمت وجود نداشته باشد. مختصات این نقطه به‌عنوان مختصات پایانی تصادم است. مجموع طول به‌دست‌آمده برابر با طول تصادم در مسیر خواهد بود که در رابطه ۱۵ نشان داده شده است.

$$C_o = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^L C_{o_{i-1}} + d(Cs_i, Ce_i) \right), & z > z_{out} \text{ and } f = 1 \\ Ce = [x, y, z] \\ f = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$= \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^L C_{o_{i-1}} + d(Cs_i, Ce_i) \right), & z \leq z_{out} \text{ and } f = 1 \\ Ce = [x, y, z] \\ \left(Cs = [x, y, z] \right), & \text{if } z \leq z_{out} \text{ and } f = 0 \\ f = 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$C_l = C_i + C_o$$

پس از محاسبه طول مسیر، توان عملیاتی و طول تصادم، تابع برآزش الگوریتم محاسبه می‌شود. در این الگوریتم با تکرار مراحل، نقاط به‌دست‌آمده بهبود داده می‌شوند تا یک مسیر نهایی بهینه به دست آید. بنابراین در گام‌های اولیه، احتمال انتخاب مسیر اشتباه و برخورد با مانع بیشتر از گام‌های پایانی است. این مقادیر در

این پژوهش به صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند. سپس، الگوریتم با اتصال نقطه مبدأ به نقاط میانی و مقصد مسیر را تعیین می‌کند. تعداد و موقعیت قرارگیری نقاط میانی با توجه به تعداد موانع موجود در مسیر و میزان پیچیدگی فضای مسئله متغیر است. از آنجایی که در این تابع، اهداف متفاوت هستند، درجه اهمیت متفاوتی هم دارند. بنابراین مشخص کردن مقدار دقیق و بهینه این ضرایب خارج از هدف این مقاله است و مقاله‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد. رابطه (۱۶) نحوه محاسبه تابع برازش را نشان می‌دهد.

$$fitness(H) = pl + (Cl)^{w_1} \times Step + e \times w_2 \quad (16)$$

۳-۴. حرکت پهباد

در این قسمت پروانه‌ها با استفاده از رابطه (۱۷) عطر و بویی در موقعیت‌های جدیدشان ایجاد می‌کنند.

$$fragrance = sensory\ modality \times (fitness(H))^{power} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) $fragrance$ شدت و قدرت عطر استشمام شده، $sensory\ modality$ روش حسی مبتنی بر بویایی، $fitness(H)$ شدت محرک است که با یک تابع هدف کدگذاری شده همبسته شده است و $power$ توانی است که وابسته به روش حسی درجه‌های مختلفی از جذب را تعیین می‌کند. در حالت حسی، منظور از حالت، ورودی خام مورداستفاده حسگرها و معنی حسی برای اندازه‌گیری شکل انرژی و پردازش آن به روش‌های مشابه است. در بیشتر حالت‌ها می‌توان $power$ و $sensory\ modality$ را در محدوده $[0,1]$ انتخاب کرد. این دو پارامتر رفتار الگوریتم را کنترل می‌کنند و نقش مهمی در تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم دارند. رفتار پهباد در الگوریتم بر دو اصل مهم

تغییرات تابع $fitness(H)$ و رابطه $fragrance$ بنا شده است. در الگوریتم BOA، یک پروانه عطر و بویی با شدت مشخص ایجاد می‌کند که با برازش آن ارتباط دارد. این الگوریتم برای انتخاب گام بعدی از یک عامل برای جابه‌جایی استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هر پروانه یک بردار موقعیت دارد که با رابطه (۱۸) به‌روزرسانی می‌شود.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + fragrance_i^{t+1} \quad (18)$$

در الگوریتم دو مرحله کلیدی وجود دارد، جستجوی سراسری و جستجوی محلی که در جستجوی سراسری با استفاده از رابطه (۱۹) گامی به سمت مناسب‌ترین پروانه یا راه‌حل (g^*) برداشته می‌شود.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \times g^* - x_i^t) \times fragrance_i \quad (19)$$

در رابطه x_i^t بردار راه‌حل x_i برای i امین پروانه در تکرار شماره t است و g^* بهترین راه‌حل فعلی در بین تمام راه‌حل‌های موجود در تکرار فعلی است. عطر i امین پروانه توسط $fragrance_i$ نشان داده شده است و r یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است. بعد از انتخاب ناحیه هدف، در مراحل بعدی گام‌های کوچک‌تر و محتاطانه‌تری تولید می‌شود تا نقاط موجود در مسیر را تشخیص دهد. بنابراین در هر لحظه نقطه بهینه بعدی را مشخص می‌کند. سپس جستجوی محلی انجام می‌شود و پروانه‌ها بر اساس نقاط میانی که توسط پرتاب هوشمند تعیین شده‌اند مسیر خود را ارزیابی و ذخیره می‌کنند. جستجوی محلی تصادفی از رابطه (۲۰) تبعیت می‌کند.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \times x_j^t - x_k^t) \times fragrance_i \quad (20)$$

که x_k^t ، x_j^t زامین و k امین پروانه در فضای حل مسئله هستند. در این مرحله، پروانه‌های مصنوعی تولید شده و عامل معرفی شده در یک





عملیات تکرارشونده بر اساس فاصله پروانه تا نقاط میانی و توان عملیاتی پروانه نقاط میانی انتخاب شده را به‌روزرسانی می‌کند و با ارزیابی تابع برازش در هر مرحله، در مورد انتخاب موقعیت جدید بعدی جهت حرکت در فضای مسئله تصمیم‌گیری می‌کند تا پروانه را از مسیر بهینه به مقصد هدایت کند. در این مرحله طول عامل‌ها (تعداد نقاط در میانه مسیر) متغیر است، بنابراین در ابتدای کار طول عامل مقدار حداکثر خواهد داشت اما در حین اجرای الگوریتم، طول عامل (تعداد نقاط به کار رفته در مسیر) تغییر خواهد کرد. سپس دو رویکرد برای به‌روزرسانی موقعیت پروانه‌ها به کار می‌رود، رویکرد اول همان رویکردی است که در الگوریتم BOA وجود دارد و رویکرد دوم استفاده از تابع پرتاب هوشمند است که به‌منظور جلوگیری از بهینه محلی استفاده می‌شود. سپس کارایی هر پروانه محاسبه شده و مسیر بهینه انتخاب می‌شود. الگوریتم از احتمال سوئیچ p برای جابه‌جایی بین جستجوی سراسری و جستجوی محلی تصادفی استفاده می‌کند. تا زمانی که معیارهای توقف مطابقت نداشته باشند، مرحله تکرار ادامه دارد. معیار توقف در این الگوریتم، حداکثر تعداد تکرار است. هنگامی که مرحله تکرار به پایان رسید الگوریتم بهترین راه - حل موجود را ارائه می‌کند. شکل ۳ فلچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵. طراحی و ارزیابی مسیر در فضای دوبعدی

پارامترهای اولیه و پیش‌فرض‌ها مطابق جدول ۱ تنظیم شده است.

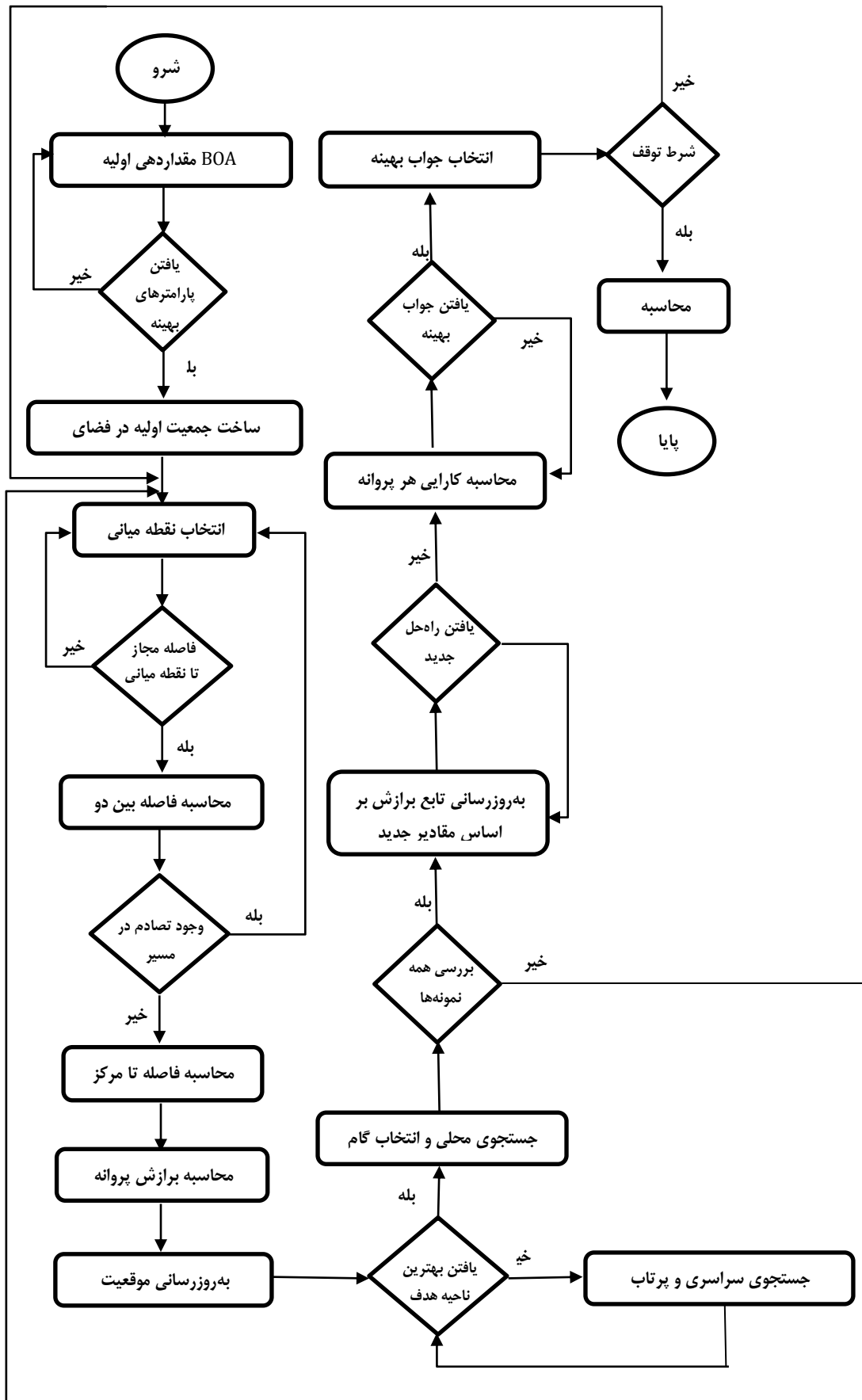
برای آزمایش اولیه موانع مختلف به شکل کروی در موقعیت‌های مشخص و به شعاع مختلف در نظر گرفته شده است. در مرحله اول، الگوریتم بر اساس دو نقطه میانی، مسیر اولیه را به دست

می‌آورد که دارای یک تصادم است و این مسیر جریمه می‌شود و از لحاظ کیفیت اولویت پایین‌تری خواهد داشت اما چون در مراحل اولیه الگوریتم است این مسیر قابل قبول بوده و الگوریتم تکرار می‌شود. پس از چند مرحله تکرار، الگوریتم مسیر دیگری را پیدا می‌کند که دارای یک نقطه میانی است و با یک مانع تماس شده است به همین دلیل علی‌رغم اینکه همچنان تعداد تصادم‌ها در این مسیر یک است اما طول تصادم نسبت به مرحله قبل کمتر است بنابراین مسیر دوم از جریان انتخاب، حذف شده و الگوریتم تکرار می‌شود. در صورتی که الگوریتم بتواند مسیر بهتری از لحاظ طول و کیفیت، پیدا کند نقاط به‌روزرسانی شده و مسیر جدید ترسیم می‌شود.

جدول ۱- خلاصه پارامترها و تکنیک‌های شبیه‌سازی

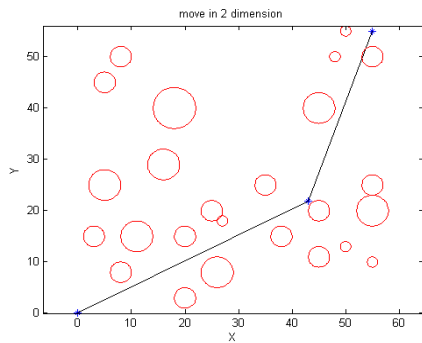
ردیف	پارامترها	مقدار
۱	محیط شبیه‌سازی	متلب
۲	اندازه جمعیت	۱۰۰
۳	نقطه شروع	۰، ۰، ۰
۴	نقطه پایان	۴۰، ۴۰، ۳۰
۵	تعداد تکرار آزمایش	۱۰۰
۶	تعداد پروانه‌ها	۵۰
۷	ابعاد شبیه‌سازی	دوبعدی - سه‌بعدی
۸	استراتژی محاسبه فواصل	مبتنی بر هندسه
۹	استراتژی انتخاب مسیر	الگوریتم فرا ابتکاری
۱۰	نوع ورودی	بهینه، تصادفی، ثابت
۱۱	w_2, w_1	به ترتیب ۲ و ۳
۱۲	OP	۳.۵

همان‌طور که در شکل ۴-ج نشان داده شده است پس از چند مرحله تکرار، الگوریتم مسیری را پیدا کرده است که با هیچ مانعی تماس نشده و تصادم ندارد و در مرحله آخر، در شکل ۴-د مسیر با هزینه کمتر انتخاب می‌شود.

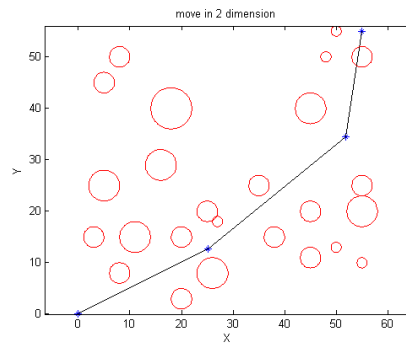


شکل ۳- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



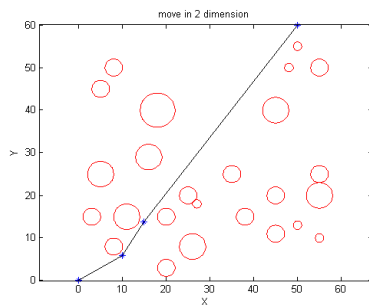


شکل ۴-ب. مرحله دوم انتخاب مسیر با یک نقطه میانی

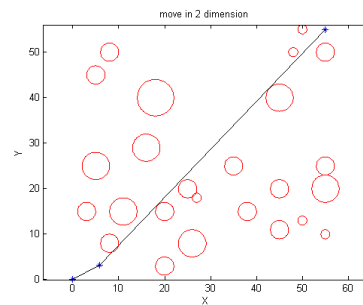


شکل ۴-ف. مرحله اول انتخاب مسیر با دو نقطه

میانی

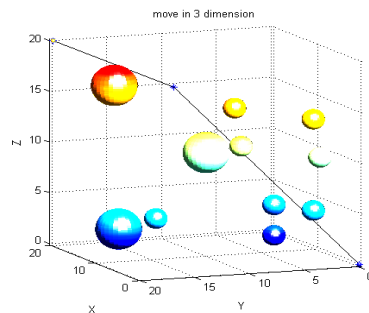


شکل ۴-د. مرحله چهارم انتخاب مسیر با دو نقطه میانی



شکل ۴-ج. مرحله سوم انتخاب مسیر با یک نقطه

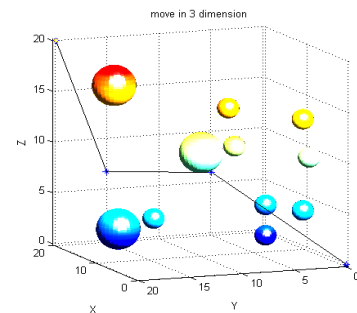
میانی



شکل ۵-ب. انتخاب مسیر با استفاده از نقاط میانی و

موانع کروی

۵۰، تعداد پروانه‌ها داخل هر جمعیت ۲۰ و تعداد تکرار آزمایش ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. در فضای سه‌بعدی به دلیل اینکه با تغییر یکی از مختصات جریان تولید مسیر تغییرات زیادی در فضا دارد بنابراین مسیرها در هر لحظه ممکن است با تکرار قبلی کاملاً متفاوت باشند اما در نهایت مسیر بهتر انتخاب خواهد شد. در ورودی این سناریو از پارامترهای تصادفی استفاده شده است.



شکل ۵-ف. انتخاب مسیر با استفاده از نقاط میانی و

موانع کروی

۶. برنامه‌ریزی مسیر در فضای سه‌بعدی و موانع هوایی

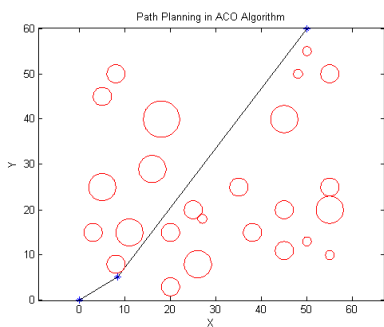
در این قسمت الگوریتم پیشنهادی در فضای سه‌بعدی با موانع کروی و با پارامترهای تصادفی اجرا شده است. شکل ۵ مراحل انتخاب مسیر توسط الگوریتم در این فضا را نشان می‌دهد. در ابتدای اجرای الگوریتم، به ترتیب نقطه شروع حرکت پهپاد (۰،۰،۰) نقطه پایان حرکت (۲۰،۲۰،۲۰)، اندازه جمعیت به صورت پیش فرض

۷. برنامه‌ریزی مسیر در فضای سه‌بعدی با موانع زمینی

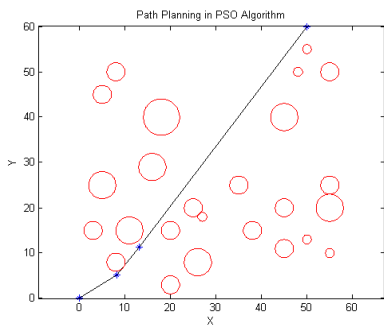
با توجه به اینکه از پهپادها به‌عنوان یک بستر سخت‌افزاری کارآمد برای نظارت و گشت‌زنی در محیط‌های عملیاتی پیچیده و دشوار که امکان حضور انسان‌ها یا استفاده از سایر ابزارها وجود ندارد استفاده می‌شود. بنابراین لازم است در کاربردهایی مانند جستجو و نجات، نظارت بر ترافیک و گشت‌زنی سیستم در یک منطقه بزرگ جغرافیایی برنامه‌ریزی مسیر در توپوگرافی‌های پیچیده انجام شود. عوامل بسیاری وجود دارد که می‌تواند مسیر پرواز را تحت‌تأثیر قرار دهد. همچنین، به دلیل عدم اطمینان از موقعیت‌های عملیاتی، مسیر بهینه پرواز نه‌تنها بین دو نقطه بلکه در تمام موقعیت‌های مسیر باید بهینه باشد. لذا عملکرد الگوریتم پیشنهادی بررسی خواهد شد.

۸. نتایج و آزمایش‌ها

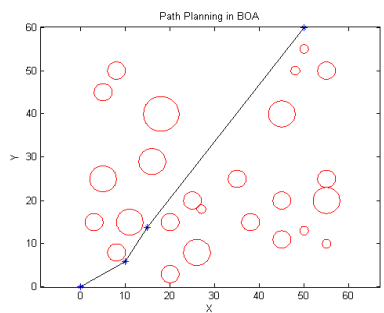
در این قسمت نتایج حاصل از اجرای سه الگوریتم، در فضای دوبعدی و سه‌بعدی و با پارامترهای تصادفی و بهینه و با توجه به طول و هزینه مسیر بررسی می‌شوند. فضای مسئله و شرایط تنظیم پارامترها برای هر دو فضا مشابه قسمت قبل است که از ذکر مجدد آن‌ها خودداری می‌شود. شکل‌های ۷ تا ۹ مسیرهای طراحی‌شده توسط سه الگوریتم در فضای دوبعدی و با پارامترهای تصادفی را پس از اتمام اجرای الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.



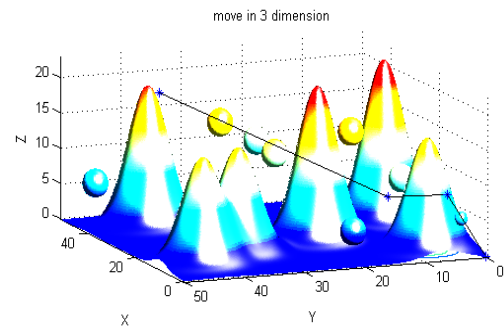
شکل ۷- مسیر طراحی‌شده توسط الگوریتم ACO



شکل ۸- مسیر طراحی‌شده توسط الگوریتم PSO

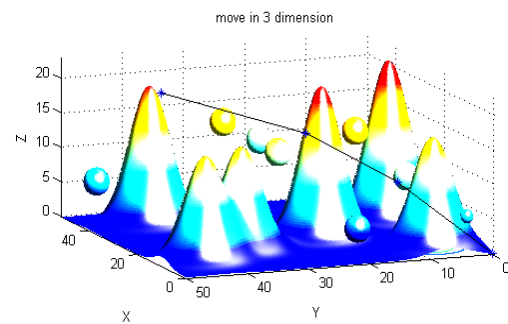


شکل ۹- مسیر طراحی‌شده توسط الگوریتم BOA



شکل ۶-الف - انتخاب مسیر با استفاده از نقاط میانی

و موانع ترکیبی



شکل ۶-ب - انتخاب مسیر با استفاده از نقاط میانی و

موانع ترکیبی

۲۰۳

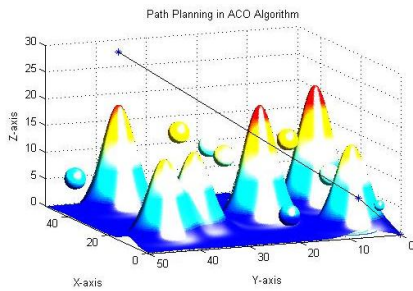
سال ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

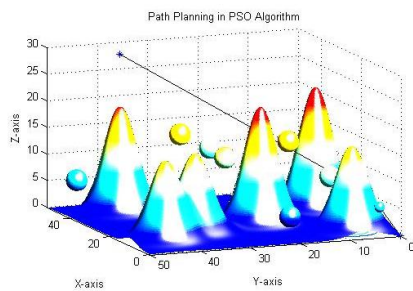
نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



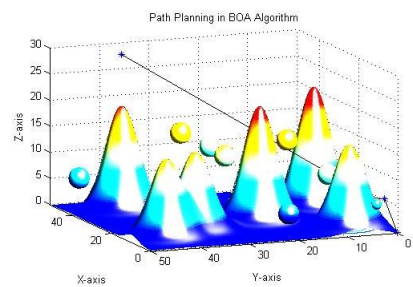
پهپادسازی پروانه
برنامه‌ریزی مسیر پهپادها در فضای سه‌بعدی مبتنی بر الگوریتم



شکل ۱۱-الف- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم ACO



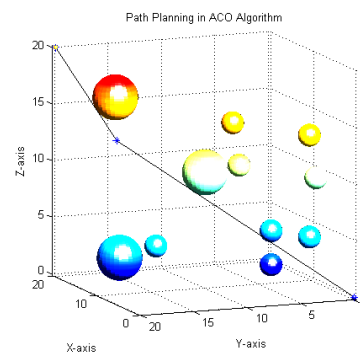
شکل ۱۱-ب- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم PSO



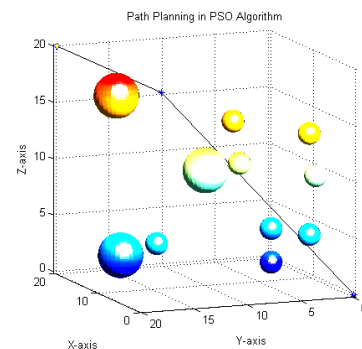
شکل ۱۱-ج- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم BOA

شکل ۱۲ منحنی همگرایی معیار هزینه تولید مسیر و بهترین موقعیت توسط سه الگوریتم ACO، PSO و BOA را بر اساس تعداد تکرار الگوریتم‌ها در فضای دوبعدی و سه‌بعدی با موانع هوایی و زمینی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در فضای دوبعدی و با پارامترهای تصادفی الگوریتم BOA پس از ۱۵ بار تکرار با کاهش ۲۰ واحدی هزینه از ۳۱۴ به ۲۹۵ می‌رسد و سپس بدون تغییر در تکرارهای بعدی همین مقدار هزینه دارد. الگوریتم PSO پس از ۴۰ بار تکرار با کاهش ۱۷ واحدی از ۳۱۴ به ۲۹۷ می‌رسد و سپس بدون تغییر در تکرارهای بعدی ادامه پیدا

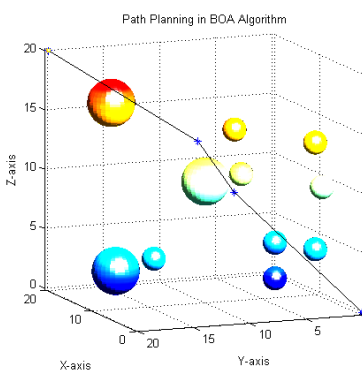
بر اساس شکل‌های ۷ تا ۹، مسیرهای تولیدشده توسط الگوریتم‌ها نسبتاً نزدیک به یکدیگر هستند و تنها اختلاف‌هایی در تعداد و موقعیت نقاط میانی با هم دارند. برای مثال الگوریتم ACO از یک نقطه میانی و الگوریتم‌های PSO و پیشنهادی از دو نقطه میانی اما با موقعیت‌های مختلف استفاده کرده‌اند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز مسیر تولیدشده در فضای سه‌بعدی با موانع زمینی و هوایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-الف- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم ACO

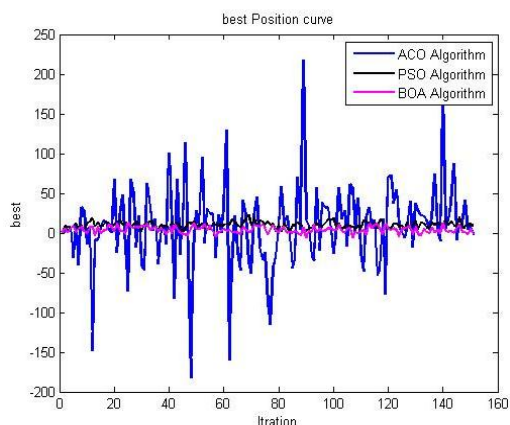


شکل ۱۰-ب- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم PSO



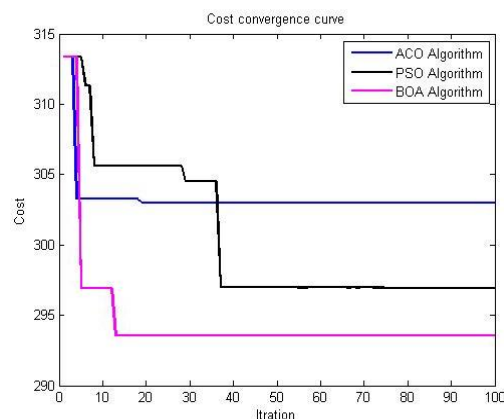
شکل ۱۰-ج- مسیر طراحی شده توسط الگوریتم BOA

می‌کند. الگوریتم ACO نیز پس از ۲۰ بار تکرار با کاهش ۱۰ واحدی از ۳۱۴ به ۳۰۴ می‌رسد و سپس بدون تغییر در تکرارهای بعدی همین مقدار هزینه دارد.

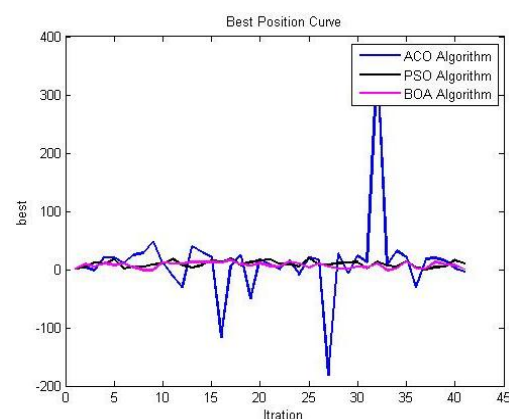


شکل ۱۲-د- منحنی بهترین موقعیت در فضای سه‌بعدی با پارامترهای تصادفی

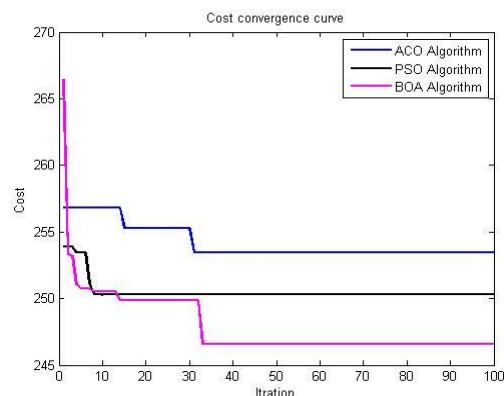
به‌طور کلی الگوریتم BOA با کمترین تعداد تکرار به کمترین هزینه در مقایسه با دو الگوریتم دیگر رسیده است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم‌ها در فضای سه‌بعدی و با پارامترهای ورودی تصادفی نشان می‌دهد الگوریتم BOA پس از ۳۲ بار تکرار با کاهش ۱۹ واحدی از ۲۶۵ به ۲۴۶ می‌رسد و سپس بدون تغییر می‌ماند. الگوریتم PSO پس از ۱۰ بار تکرار با کاهش ۳ واحدی از ۲۵۴ به ۲۵۱ می‌رسد و الگوریتم ACO پس از ۳۰ بار تکرار با کاهش ۳ واحدی از ۲۵۷ به ۲۵۴ می‌رسد. به‌طور کلی، الگوریتم BOA با تکرار اجرا به کمترین هزینه می‌رسد در حالی که دو الگوریتم دیگر در تکرارهای بعدی بهبود چندانی در کاهش هزینه نخواهند داشت. برای بهبود نتایج از الگوریتم حریم‌ناهی استفاده شده است. در این حالت پارامترهای مربوط به جمعیت مانند اندازه و تعداد آن در کل حالت‌های فضای مسئله بررسی شده و با روش حریم‌ناهی، بهترین‌های آن‌ها به‌عنوان ورودی بهینه الگوریتم، در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی با پارامترهای بهینه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده، با انتخاب پارامترهای بهینه توسط الگوریتم حریم‌ناهی، به‌وضوح هزینه مسیر در هر سه الگوریتم کاهش یافته است.



شکل ۱۲-الف- منحنی همگرایی هزینه در فضای دوبعدی با پارامترهای تصادفی

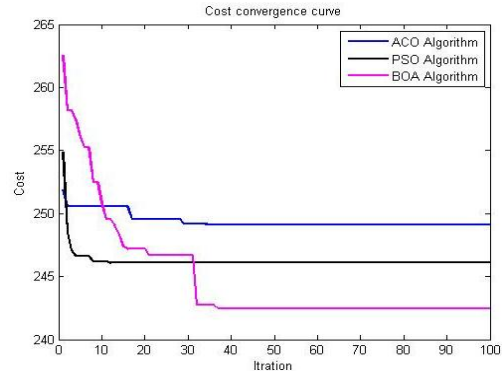


شکل ۱۲-ب- منحنی بهترین موقعیت در فضای دوبعدی با پارامترهای تصادفی

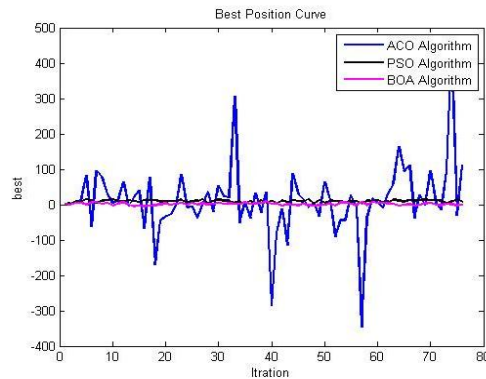


شکل ۱۲-ج- منحنی همگرایی هزینه در فضای سه‌بعدی با پارامترهای تصادفی

ضمن اینکه منحنی بهترین موقعیت در گام‌های مختلف نیز نوسان کمتری داشته است.

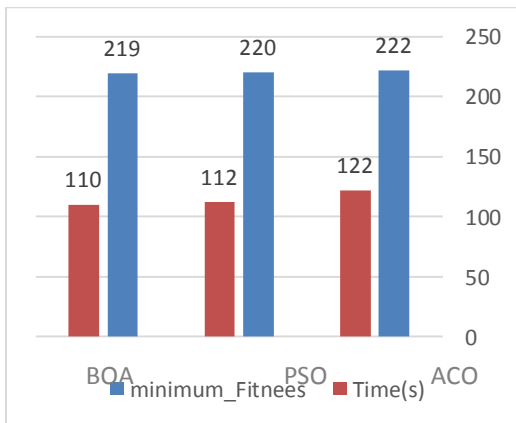


شکل ۱۳-الف - منحنی همگرایی هزینه در فضای سه‌بعدی با پارامترهای بهینه



شکل ۱۳-ب - منحنی بهترین موقعیت در فضای سه‌بعدی با پارامترهای بهینه

در حل مسائل ترکیبی و چندهدفه دارند از تکنیک‌های کاربردی برای یافتن راه‌حل هستند. در این پژوهش از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی پروانه با یک عامل پرتاب هوشمند استفاده شده است که جستجوی سراسری را بهبود داده و از افتادن در بهینه محلی جلوگیری می‌کند. همچنین پارامترهای ورودی الگوریتم به دو روش تصادفی و بهینه محاسبه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده با دو الگوریتم کلونی مورچه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقایسه شد. بررسی منحنی همگرایی هزینه و بهترین مسیر نشان می‌دهد در شرایط کاملاً یکسان، الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم مذکور داشته است. همچنین از نظر زمان اجرا و میزان تابع برازش کمینه بوده است. ضمن اینکه مسیر برنامه‌ریزی شده در الگوریتم پیشنهادی قابلیت مانور بهتری در برابر موانع داشته و بنابراین در صورتی که ویژگی‌های فیزیکی پهباد محدودکننده نباشد در محیط با موانع زیاد قابل قبول خواهد بود.



شکل ۱۴ - نمودار مقایسه زمان اجرا و کمترین مقدار تابع برازش در سه الگوریتم فراابتکاری

الگوریتم با نوع ورودی بهینه و تصادفی نیز آزمایش شد که بر اساس نتایج، عملکرد الگوریتم با ورودی تصادفی نزدیک به بهینه بوده در حالی که سربار ناشی از محاسبه پارامترهای بهینه را نیز ندارد.

در شکل ۱۳ نیز نشان داده شده است که الگوریتم BOA از نظر زمان اجرا و میزان تابع برازش به نسبت دو الگوریتم ACO و PSO کمینه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت از الگوریتم BOA می‌توان در فضای سه‌بعدی پیچیده به‌عنوان جایگزین الگوریتم‌های پرکاربردی مانند کلونی مورچه و بهینه‌سازی ذرات به‌منظور برنامه‌ریزی مسیر پهبادهایی که ذاتاً در این فضا حرکت دارند استفاده کرد.

۹. نتیجه‌گیری

مسئله برنامه‌ریزی مسیر بهینه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه مسیریابی پهبادها است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری به دلیل توانایی خوبی که



- photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia," *J. Struct. Geol.*, vol. 85, pp. 168–187, Apr. 2016. doi:10.1016/j.jsg.2016.02.012
- [9] PwC, "Global market for commercial applications of drone technology valued at over 127bn," (Accessed on February 2018). [Online]. Available: <https://press.pwc.com/>
- [10] S. D. Intelligence, "The global UAV payload market 2017-2027," (Accessed on February 2018). [Online]. Available: https://www.researchandmarkets.com/research/nfpsbm/the_global_uav
- [11] M. Ferry, Z. Tu, L. Stephens, G. Prickett, Towards true uav autonomy, in: 2007 Information, Decision and Control, IEEE, 2007, pp. 170–175.
- [12] T. Omkar, G. Jugal, "A game theoretic approach to UAV routing and information collection", M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017
- [13] H. Chen, X.-m. Wang, Y. Li, A survey of autonomous control for uav, in: 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Vol. 2, IEEE, 2009, pp. 267–271.
- [14] S. Hrabar, 3d path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft uavs, in: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2008, pp. 807–814.
- [15] Z. W. Geem, J. H. Kim, G. V. Logana than, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, simulation 76 (2)(2001) 60–68.
- [16] Arora, S., Singh, S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Comput* 23, 715–734 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>
- [17] S. Aggarwal and N. Kumar, Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges, *Computer Communications* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>.
- [1] J. Sánchez-García, D. G. Reina, and S. L. Toral, "A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 90, pp. 129–148, Jan. 2019. doi:10.1016/j.future.2018.07.048.
- [2] T. Kopfstedt, M. Mukai, M. Fujita, and C. Ament, "Control of formations of UAVs for surveillance and reconnaissance missions," *IFAC Proc. Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 5161–5166, 2008. doi:10.3182/20080706-5-kr-1001.00867.99716VOLUME 7, 2019
- [3] D. Bein, W. Bein, A. Karki, and B. B. Madan, "Optimizing border patrol operations using unmanned aerial vehicles," in *Proc. 12th Int. Conf. Inf. Technol.-Generations*, Apr. 2015, pp. 479–484. doi:10.1109/itng.2015.83
- [4] R. R. Pitre, X. R. Li, and R. Delbalzo, "UAV route planning for joint search and track missions—An information-value approach," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48, no. 3, pp. 2551–2565, Jul. 2012. doi:10.1109/taes.2012.6237608.
- [5] C. Barrado, R. Messeguer, J. Lopez, E. Pastor, E. Santamaria, and P. Royo, "Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network," *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 9, no. 4, pp. 24–32, Oct./Dec. 2010. doi:10.1109/mprv.2010.54
- [6] E. Semsch, M. Jakob, D. Pavlicek, and M. Pechoucek, "Autonomous UAV surveillance in complex urban environments," in *Proc. IEEE/WIC/ACM Int. Joint Conf. Web Intell. Intell. Agent Technol.*, Sep. 2009, pp. 82–85. doi:10.1109/wi-iat.2009.132.
- [7] F. Jiang and A. Lee Swindlehurst, "Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink," in *Proc. IEEE GLOBECOM Work shops*, Dec. 2010, pp. 1766–1770. doi:10.1109/glocomw.2010.5700245.
- [8] S. A. Vollgger and A. R. Cruden, "Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV



- for uav path in disaster rescue, in: Networking and Network Applications (NaNA), 2017 International Conference on, IEEE, 2017, pp. 225–231.
- [28] L. Yue and H. Chen, Unmanned vehicle path planning using a novel ant colony algorithm, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2019) 2019:136 <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1474-5>
- [29] J. Ning, Q. Zhang, C. Zhang, et al., A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm. *Inf. Sci.* 433–434, 142–162 (2018)
- [30] Kirsal Ever, Yoney. (2017). Using simplified swarm optimization on path planning for intelligent mobile robot. *Procedia Computer Science*. 120. 83-90. [10.1016/j.procs.2017.11.213](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.213).
- [31] Geng, Q. and Zhao, Z. 2013. A kind of route planning method for UAV based on improved PSO algorithm. 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2328--2331.
- [32] S. A. Gautam and N. Verma, "Path planning for unmanned aerial vehicle based on genetic algorithm & artificial neural network in 3D," 2014 International Conference on Data Mining and Intelligent Computing (ICDMIC), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICDMIC.2014.6954257.
- [33] Sonmez, E. Kocyigit and E. Kugu, "Optimal path planning for UAVs using Genetic Algorithm," 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015, pp. 50-55, doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152274.
- [34] U. Cekmez, M. Ozsiginan, O.K. Sahingoz, "Adapting the GA approach to solve Traveling Salesman Problems on CUDA architecture", 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2013), pp. 423-428, 2013.
- [35] S. Choueiry, M. Owayjan, H. Diab and R. Achkar, "Mobile Robot Path Planning Using Genetic Algorithm in a
- [18] K. Yang, S. Sukkarieh, 3d smooth path planning for a uav in cluttered natural environments, in: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2008, pp. 794–800
- [19] Wang, Han et al. "On optimal path planning for UAV based patrolling in complex 3D topographies." 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA) (2016): 986-990.
- [20] R. Geraerts, Planning short paths with clearance using explicit corridors, in: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2010, pp. 1997–2004
- [21] R. DuToit, M. Holt, M. Lyle, S. Biaz, Uav collision avoidance using rrt* and los maximization technical report# csse12-03.
- [22] S. Koenig, M. Likhachev, Improved fast replanning for robot navigation in unknown terrain, in: Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292), Vol. 1, IEEE, 2002, pp. 968–975.
- [23] Nash, S. Koenig, C. Tovey, Lazy theta*: Any-angle path planning and path length analysis in 3d, in: Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2010.
- [24] S. Hrabar, 3d path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft uavs, in: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2008, pp. 807–814.
- [25] Z. W. Geem, J. H. Kim, G. V. Logana than, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *simulation* 76 (2)(2001) 60–68.
- [26] Arora, S., Singh, S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Comput* 23, 715–734 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>
- [27] X. Ji, Q. Hua, C. Li, J. Tang, A. Wang, X. Chen, D. Fang, 2-optaco: An improvement of ant colony optimization



Static Environment," 2019 Fourth International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), pp. 1-6.2019.

- [36] D. M. Pierre, N. Zakaria, and A. J. Pal, "Master-slave parallel vector-evaluated genetic algorithm for unmanned aerial vehicle's path planning," in Proceedings of the 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS '11), pp. 517–521, Malacca, Malaysia, December 2011.
- [37] F. C. J. Allaire, M. Tarbouchi, G. Labonté, and G. Fusina, "FPGA implementation of genetic algorithm for UAV real-time path planning," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 54, no. 1–3, pp. 495–510, 2009.
- [38] M. A. P. Garcia, O. Montiel, O. Castillo, R. Sepúlveda, and P. Melin, "Path planning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function evaluation," Applied Soft Computing, vol. 9, no. 3, pp. 1102–1110, 2009. View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)
- [39] Jevtić, D. Andina, A. Jaimes, J. Gomez, and M. Jamshidi, "Unmanned aerial vehicle route optimization using ant system algorithm," in Proceedings of the 5th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE '10), pp. 1–6, Loughborough, UK, June 2010. View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)
- [40] R. Samar and A. Rehman, "Autonomous terrain-following for unmanned air vehicles," Mechatronics, vol. 21, no. 5, pp. 844–860, 2011.

۲۰۹

سال ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و
فناوری هوا فضا



Algorithm1. BOA – PATH_PLANNING

```

1: Objective BOA_function  $f(x, y, z), x$ 
   = (length, cost, collision), dim
   = no. of dimension
2: Generate initial population of n Butterflies  $b_i = (i$ 
   = 1, 2, ..., n)
3: Stimulus Intensity  $l_i$  at  $b_i$  is Determined by  $f(b_i)$ 
4: Define ensorymodalityc, power exponent a and
   probabability switch P
5: Call Best_Position()
6: While stopping criteria not met do
7: For each butterfly in population do
8: Call Fitness_calculation() using Algorithm2
9: Calculate fragrance for bf using Eq.(17)
10: End for
11: For each butterfly in population do
12: Generate a random number r from [0,1]
13: If  $\text{rand}(0,1) > p$  and Switch then
14: Move towards best butterfly
   / solution using Eq. (19)
15: else
16: Move randomly using Eq. (20)
17: End if
18: End for
19: Update the value of a
20: End while
21: Output the best solution found

```

Algorithm3. Collision calculation

```

1: Objective function mountains obstacles  $z = (x, y)$ 
2: For each length do
3: normal distribution function calculation
   / solution using Eq. (15)
4: end
5: end

```

Algorithm2. Fitness_calculation

```

1: Define uav velocity v, number of bf in each population Nc
   Population size NoI
2: While stopping criteria not met do
3: path length parameters generation
4: For each butterfly in population do
5: while length is not zero do
6: Call IAP_func %Intelligent agent produ
7: Call Throw point func
8: For each LenghtPathpoint – 1 not zero do
9: For each LenghtObs not zero do
10: ptr calculation
11:
   cir_collision_lenght calculation
12: end for
13: end while
14: while length is not zero do
15:  $p_i = \text{statr point}$ 
16:  $p_{i+1} = \text{Mid point}$ 
17: For each LenghtObs not zero do
18:
   con_collision_lenght calculation
19: end
20: end while
21: fitness calculation
22: Collision lenght calculation
23: end for
24: end while

```

Algorithm4. Throw point func

```

1: For each LenghtPathpoint – 1 not zero do
2: Distanceeucl calculation [pathpoint(I,I + 1)]
3: Path length calculation
4: If Distanceeucl > Throughput then
5: Penalty Calculation
6: Set Switch
7: end
8: end

```

Algorithm5. Find the optimal parameters

```

1: Define population size pop, number of bf in each
   pop NoG, maximum number of generation M
2: Initialize the population random
3: Set parameter PS in the interval [min,...,max]
4: Set parameter NoGe in the interval [min,...,max]
5: Set parameter Max_G in the interval
   [min,...,max]
3: For each population size = PS do
4: For each number of gene = NoGe do
5: For each max number of gene= Max_G do
6: Generate population in 3D
7: Generate sample population
8: Update population
9: Call BOA_function()
10: Calculate cost, bestpos, popsize, NoG, MG
11: end for
12: end for
13: end for

```

Algorithm6. IAP : Intelligent agent production

```

1: Load Dataset of Obstacle
2: Set parameters (population size, total number of
   iteration, probability switch, power_exponent,
   sensory_modality)
3: Initialize the positions of search agents
4: For each Number of Itrations do
5: Generation Number of MidPoint / based on the
   length of the variable
   to 3D path point 6: Reshape Papulation Value
7: Add start and end point to mid points
8: Generate path point matrix
9: Fill in matrix pathpoint based on population matrix divi
10: end for
Algorithm6.Best_Position()
1: Find Minimum Fitness
2: Find best_pos based on variable leanght
3: Update variable leanght
4: end

```

