



یک رویکرد کارا در مسیریابی پرنده‌های بدون سرنشین مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته

علی اصغر حیدری^۱، رحیم علی عباسپور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

چکیده

رشد روزافزون به‌کارگیری فناوری پرنده‌های بدون سرنشین (UAS) در زمینه‌های مرتبط با علوم مکانی و خدمات مکان‌مینا موجب شده است تا امروزه بتوان از این سکوها به‌منظور تهیه تصاویر رقمی، پایش محیط زیست، زیرساخت‌ها و تاسیسات حساس و همچنین انتقال سریع کالا و خدمات پزشکی به مجروحان بهره‌گیری نمود. در این زمینه، توسعه استراتژی‌های سریع و کارا جهت مسیریابی سکوها می‌تواند موجب کیفیت‌بخشی، بهبود بازدهی و بهره‌وری عملیات در این مأموریت‌ها شود. در این پژوهش، یک رهیافت کارا بر مبنای الگوریتم رقابت استعماری جهت مسیریابی سکوها ارائه شده که می‌تواند موجب بهبود بهره‌وری و افزایش خودکارسازی مأموریت‌های مختلف از قبیل کاربردهای جدیدی همچون سناریوهای انتقال کالا و خدمات پزشکی گردد. بدین هدف، ابتدا با توجه به محدودیت‌ها و اهداف سناریو، یک مدل بهینه‌سازی مقید تک هدفه برای این مسئله طراحی شده است. سپس، به‌منظور ارتقای قابلیت‌های جستجو و اکتشاف الگوریتم رقابت استعماری، گام حرکت آن با فیزیک گرانش تلفیق شده است. در مرحله شبیه‌سازی، نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی با نتایج نسخه‌های دیگر این روش با توجه معیارهایی همچون کیفیت، دقت، زمان اجرا، نرخ موفقیت و کیفیت مسیرهای تولیدی مقایسه شده است. بررسی نتایج در شبیه‌سازی‌های متعدد نشان‌دهنده کارایی و استحکام استراتژی پیشنهادی و کسب مسیرهای با دقت و کیفیت برتر در سناریوی مطرح شده است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم رقابت استعماری، پرنده‌های بدون سرنشین، مسیریابی.

*نویسنده مسئول: رحیم علی عباسپور، آدرس پستی تهران، امیرآباد شمالی، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، تلفن: ۰۹۱۲۳۰۱۱۲۵۵

Email: abaspour@ut.ac.ir

۱- مقدمه

(برای مثال کوهنوردی در منطقه‌ای کوهستانی، برفی و دور از دسترس)، سکوی مجهز به تجهیزات اورژانسی پزشکی به موقعیت هدف ارسال کرده و خدمات اولیه را به مجروح می‌رساند. در این فرآیند، زمان به یک عامل حیاتی در امدادرسانی سریع به مجروح تبدیل شده است، از این‌رو، یکی از گام‌های اصلی در فرآیند ناوربری این سیستم، مسیریابی بهینه، سریع و کارای سکو با صرف کمترین زمان و منابع ممکن خواهد بود. برای مثال، در شکل (۱) مراحل اصلی اجرای یک سیستم مکان‌مبنای خدمات پزشکی بر اساس سامانه مطرح در [۲] نمایش داده شده است. از دیگر سوی، کشور ایران به‌شدت نیازمند این فناوری است. کشور ایران همواره یکی از مناطق حادثه‌خیز خاورمیانه بوده و زمین‌لرزه‌ها و حوادث غیرمترقبه زیادی را در حافظه تاریخی خود ثبت کرده است. با این حال، تنها تلفات انسانی سوانح رانندگی در جاده‌های کشور به مشابه تلفات انسانی یک زلزله مهیب در هر سال است [۳]. با توجه به مشکلات حمل‌ونقل زمینی همچون ترافیک، یکی از انتخاب‌های ممکن دسترسی سریع به مجروحان راه‌های غیرزمینی و هوایی است [۴]. به دلیل عدم دسترسی زمینی، در بسیاری از مناطق کوهستانی و حادثه‌خیز حتی امکان ارسال زمینی تجهیزات پزشکی و آمبولانس به محل حادثه وجود ندارد [۵]. در شرایط این‌چنینی، به‌کارگیری فناوری UAS یکی از بهترین انتخاب‌ها خواهد بود. در کشور ایران زیرساخت سخت‌افزاری سکوهای پرنده موجود است و به‌کارگیری آن به همراه زیرساخت‌های نرم‌افزاری لازم جهت ناوربری خودکار، در آینده‌ای نزدیک موجب بهبود بهره‌وری و کارایی خدمات اورژانسی در سوانح کشور خواهد شد.

در حال حاضر، پرنده‌های بدون سرنشین^۱ (UAS) از آخرین فناوری‌های مورد استفاده در خدمات مکان‌مبنا^۲ (LBS) و مدیریت بحران و زمینه‌های مختلفی از جمله حفاظت از محیط‌زیست^۳، پایش ویرانی‌های پس از زلزله، امداد و نجات و جستجو و پایش مجروحان هستند [۱]. این سکوها قادرند با حمل یک یا چند سنجنده به‌صورت خودکار یا با هدایت کاربر، عملیات پرواز را به انجام برسانند. از این‌رو، افزایش بهره‌وری، خودکارسازی، دقت، امنیت پرواز و هم‌چنین کاهش هزینه‌ها و ریسک در مأموریت‌های UAS، طراحی و مسیریابی^۴ بهینه سکوها به‌صورت الگوریتم بنیان و مستقل از سهوهای عامل انسانی، به امری اجتناب‌ناپذیر مبدل شده است. بر همین اساس، هر برنامه‌ریز مسیر می‌تواند به‌عنوان بخشی از فرآیند ناوربری، شبیه‌سازی و امکان‌سنجی پیش از پرواز جهت بهینه‌سازی خطوط سیر پرواز نیز به‌کار گرفته شود [۲].

در این مقاله، ضمن ارائه یک الگوریتم جدید جهت مسیریابی سکوها، کاربردهای این تحقیق در قالب یکی از خدمات مکان‌مبنای جدید بررسی گردیده است. در زمینه خدمات مکان‌مبنا، سیستم ارسال کالای شرکت آمازون^۵ به‌تازگی توانسته است از UAS در زمینه انتقال کالا به مشتریان خود بهره‌گیری کند. هم‌چنین، در فوریه ۲۰۱۵، کاربرد جدیدی از این فناوری در زمینه انتقال کالا و خدمات فوری پزشکی به مجروحین در مکان‌های با دسترسی پایین ثبت اختراع شد [۲]. در این سیستم پس از تشخیص موقعیت جغرافیایی مجروح

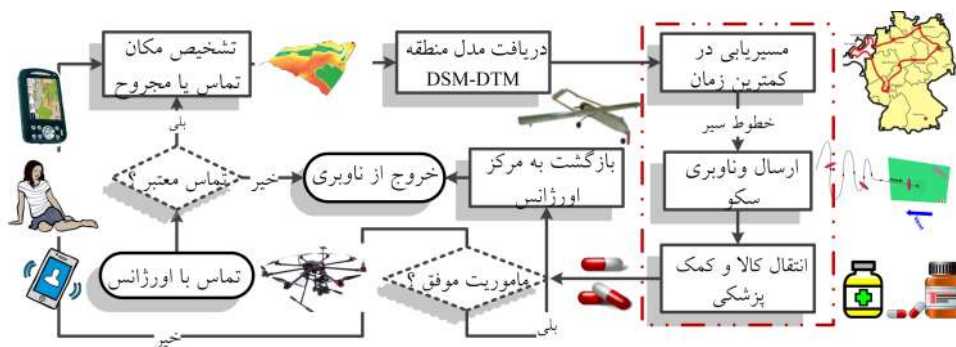
¹ Unmanned Aerial Systems

² Location-based Services

³ Environmental Conservation

⁴ Path Planning

⁵ Amazon's Drone-based Delivery System



شکل ۱: سرویس مکان‌مبنای خدمات پزشکی بر اساس سامانه مطرح‌شده در مرجع [۲]

به‌کار گرفته‌اند، ارائه الگوریتم‌های جدید منطبق بر قوانین طبیعی و یا ارتقاء عملکرد الگوریتم‌های فرا اکتشافی^۷ پیشین برای یافت پاسخ‌های با کیفیت بهتر در زمان معقول بوده است [۷]. الگوریتم مسیریابی که افزون بر برآورد اهداف مأموریت و وظایف سیستم پیچیدگی محاسباتی و زمانی کمتری داشته باشد، جهت ناوبری سکوها مناسب‌تر خواهد بود [۸]. در بیشتر پژوهش‌های پیشین، قيودی شامل ارتباطات بی‌سیم، شعاع چرخش سکوها، ایمنی سیستم، مؤلفه‌های سرعت و ارتفاع و شعاع شناسایی هدف در مدل‌سازی مسیریابی لحاظ گردیده‌اند [۶، ۷ و ۸]. مزیت بهره‌گیری از روش‌های فرا اکتشافی در حل مسئله مسیریابی UAS در پژوهش [۹] اثبات شده است. در این پژوهش، الگوریتم فرا اکتشافی MCACEA^۸ برای حل این مسئله پیشنهاد و به‌کار گرفته شده که قادر به محاسبه بهترین مسیرهای ممکن با در نظر گرفتن محدودیت‌های واقع‌گرایانه متعددی بوده است.

در پژوهش [۸] در سال ۲۰۱۵، روش جدیدی نیز بر مبنای الگوریتم تکامل تفاضلی (DE^۹) موسوم به MDEL^{۱۰} به‌منظور رویارویی با مسئله مسیریابی

بدین هدف، یکی از مراحل اصلی ناوبری خودکار در کنار تخصیص وظایف^۱، شناسایی موانع^۲، اجتناب از موانع^۳ و تولید خط سیر^۴، مسیریابی سکوها است [۶]. از این حیث، مفاهیم مطرح در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی سریع و کارا جهت مسیریابی سکوها در سناریوهای مختلف از قبیل سناریوهای انتقال کالا و خدمات پزشکی^۵ به‌کار گرفته شود. بدین منظور، پس از مرور پژوهش‌های پیشین، یک الگوریتم بهبودیافته جدید بر مبنای بهینه‌سازی رقابت استعماری ارائه شده و سپس به‌صورت جامعی مورد ارزیابی واقع خواهد شد.

ثابت شده است که مسئله مسیریابی UAS از رده مسائل درجه غیر چندجمله‌ای سخت^۶ است [۶، ۸ و ۱۱] و پیچیدگی مسئله به‌سرعت با افزایش اندازه مسئله افزایش می‌یابد. از این‌رو، روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک از لحاظ زمانی کارایی مناسبی نسبت به روش‌های تقریبی در حل مسئله مسیریابی با پیچیدگی‌های موجود نخواهند داشت. از این‌رو، یکی از رویکردهایی که پژوهشگران در پژوهش‌های پیشین

¹ Task Assignment

² Obstacle Detection

³ Obstacle Avoidance

⁴ Trajectory Generation

⁵ Medical Support and Aid Delivery Missions

⁶ NP-hard

⁷ Metaheuristic

⁸ Multiple Coordinated Agents Co-evolution EA

⁹ Differential Evolution

¹⁰ Modified Differential Evolution with Level

Comparison

بدون برخورد با توپوگرافی به یک موقعیت مشخص در چارچوب زمانی-مکانی تعریف شده مأموریت برسد [۶، ۸، ۹ و ۱۱-۱۴]. در این توصیف، چند نکته مهم نهفته است. نخست، بر اساس فرض‌های مسئله، ویژگی‌های محیط پرواز سکو باید مشخص باشد. در صورتی که هدف تعیین خط سیر بهینه باشد، اما اطلاعاتی از محیط سکو در دست نباشد، حل مسئله در حالت برخط^۳، مشروط به تولید آنی مدل رقمی^۴ منطقه توسط سنجنده‌های نصب شده بر سکو خواهد بود. به عنوان یکی دیگر از فرض‌ها، قبل از شروع فرآیند برنامه‌ریزی، باید وضعیت کنونی سکو از قبیل مختصات اولیه (به طور معمول، موقعیت ایستگاه پرتاب) و همچنین وضعیت پارامترهای دینامیکی آن مشخص باشد. با توجه به مأموریت‌های مختلف سکوها پرنده، در موضوع مسیریابی، اهداف اصلی مورد نیاز کمینه‌سازی طول مسیر و همچنین کمینه‌سازی انرژی مصرفی سکو بوده‌اند. در این زمینه، مسیریابی بهتر است که نتایج را به صورت سریع‌تر و با خطای کمتری ارائه کند. در این پژوهش، این مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه مقید با متغیرهای پیوسته طراحی شده است، به گونه‌ای که با لحاظ کردن پارامترهای دینامیکی پرواز و با پرهیز از نواحی NFZ و بیرون از نقشه عملیاتی، مسیری سه‌بعدی با کمترین مسافت و انرژی مصرفی محاسبه گردد. مسیرها تنها بر پایه نقاط کنترل ساخته می‌شوند. در صورتی که نقاط کنترل در دست باشد، می‌توان هر نوع خمی را با توجه به نیازها و ملزومات مسئله محاسبه کرد. در نتیجه با هر بار اجرای الگوریتم برنامه‌ریز (مسیریاب)، دنباله‌ای از نقاط کنترل بهینه برای هر خط سیر ذخیره می‌شود. در این تحقیق، نیازهای زیر مطرح است که در انتخاب نوع خم نیز در نظر گرفته شده است:

ارائه شد. در پژوهش حاضر نیز طراحی قیود مسئله با توجه به پژوهش‌های [۶، ۸ و ۹] صورت گرفته است. در پژوهش [۶]، کارایی ۳۶ نسخه مختلف از الگوریتم‌های مبتنی بر توده ذرات (PSO^۱)، ژنتیک (GA^۲) و تکامل تفاضلی جهت حل مسئله سه‌بعدی واقع‌گرایانه بر مبنای ۴ سناریوی مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج تحقیق [۶] بیانگر آن است که نه تنها الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده جهت مسیریابی در سه بعد کارا هستند، بلکه از منظر شاخص‌های آماری نیز عملکرد بهتری را به نمایش گذاشته‌اند. در جدول (۱) نیز خلاصه‌ای از تلاش‌های کلیدی در زمینه بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرا اکتشافی جهت حل مسئله مسیریابی سکوها ارائه شده است. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های دقیق نیز می‌توانند عملکرد مناسبی در حل مسئله داشته باشند، اما به دلیل پیچیدگی‌های موجود از نظر زمانی به صرفه نیستند. همچنین، با توجه به پارامترهای مسئله، تخمین مسیرهای بهینه در زمان مناسب مورد نیاز بیشتر مأموریت‌های سکو محور است. در مراجع جدول (۱)، روش‌های فرا اکتشافی عملکرد خوبی را در حل مسائل مسیریابی سکوها به اثبات رسانیده‌اند.

۲- مسیریابی سکوها پرنده

در مسئله مسیریابی UAS، با فرض مشخص بودن مختصات، پیکربندی فضایی محیط حرکت و حالت کنونی سکو و یا گروهی از سکوها، هدف تعیین مسیرهای بهینه، قابل پرواز و کنش پذیر جهت حرکت پیوسته سکو است؛ به گونه‌ای که در کمترین زمان ممکن، تابع هدف از پیش طراحی شده‌ای با در نظر گرفتن قیود دینامیکی، ارتفاعی و مکانی حرکت سکو و پارامترهای مؤثر در مأموریت پرواز، بهینه گردد و سکو بتواند با حرکت بر روی مسیر به دست آمده

³ Online

⁴ Digital Terrain Model (DTM)

¹ Particle Swarm Optimization

² Genetic Algorithm

- دستیابی به مسیر قابل پرواز و کنش پذیر: UAS باید قادر به دنبال کردن خطوط سیر محاسبه‌شده باشد. از این رو، طراحی مسیره‌ها باید به‌اندازه‌ای انعطاف داشته باشد که سکو بتواند مطابق با تغییرات آن و چرخش‌های خود، مسیر را به‌صورت پیوسته دنبال کند.
- کاهش پیچیدگی هندسی مسیر: هر چه پیچیدگی هندسی خم کمتر باشد، مسیر پرواز قابلیت کنش پذیری بیشتری خواهد داشت.
- انعطاف‌پذیری در طراحی مأموریت‌های متفاوت: ویژگی‌های مسیره‌های محاسبه‌شده بهتر است تا حد ممکن تابع تغییرات پارامترهای طراحی مأموریت، نوع سکو و ساختار برنامه‌ریز نباشد.
- امکان طراحی دوباره قطعات مسیر از یک نقطه به بعد: گاهی لازم است تا مسیر پرواز در یک محدوده مشخص بروز رسانی شود، بدون آنکه سایر نقاط محاسبه‌شده دستخوش تغییر شوند.
- کاهش پیچیدگی زمانی - حافظه الگوریتم: نوع خم ترسیم‌شده نباید تا حد ممکن خود موجب ایجاد بار محاسباتی اضافه شود.
- با توجه به نکات بالا، در الگوریتم‌های توسعه داده‌شده در این تحقیق از مدل ریاضی خم‌های بزیه بهره‌گیری شده که معادله آن‌ها می‌تواند بر اساس رابطه‌های (۱ و ۲) بیان شود [۱۶]:

جدول ۱: خلاصه‌ای از تلاش‌های کلیدی در زمینه برنامه‌ریزی مسیر با الگوریتم‌های فرا اکتشافی در سال‌های گذشته

سال	مرجع	مشارکت مؤلف
۲۰۰۵	[۷]	توسعه یک برنامه‌ریز تکاملی کارا جهت حل مسئله سه‌بعدی
۲۰۰۸	[۱۰]	ارائه یک الگوریتم تکاملی مؤثر جهت حل مسئله در محیط‌های پرخطر
۲۰۱۰	[۱۱]	ارائه الگوریتم ترکیبی ACO-DE در مسئله سه‌بعدی و محیط شبیه‌سازی‌شده
۲۰۱۲	[۱۲]	پیاپی‌سازی الگوریتم‌های θ -QPSO، PSO، GA و DE جهت حل مسیریابی سه‌بعدی
۲۰۱۳	[۱۳]	مقایسه اجرای موازی الگوریتم‌های PSO و GA
۲۰۱۳	[۱۴]	ارائه الگوریتم ترکیبی PSO کوانتومی و DE جهت حل مسئله در محیط‌های دریایی
۲۰۱۳	[۶]	مقایسه عملکرد ۳۶ نوع از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه مبتنی بر GA، PSO و DE
۲۰۱۵	[۱۵]	ارائه الگوریتم کارای MS-PSO ^۲ در مقایسه با GA و PSO در مسیریابی بدون برخورد چندین پرنده
۲۰۱۵	[۸]	ارائه روش مقید MDELIC جهت برنامه‌ریزی سه‌بعدی در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده و واقع‌گرایانه

^۱ Phase angle-encoded Quantum-behaved Particle Swarm Optimization

^۲ Maneuver Selection Particle Swarm Optimization

که هر چه اختلاف گام‌های حرکت در بین نقاط مسیر بیشتر شود، میزان انرژی مصرفی سکو جهت پیمودن این گام‌ها نیز افزایش می‌یابد. بر این اساس، این تابع می‌تواند بر مبنای نسبت مجموع اختلافات طول قطعات پیموده شده به طول تقریبی کل مسیر و به صورت رابطه (۵) مدل‌سازی شود:

رابطه (۵)

$$Cost_2 = (\psi/L_0) \sum_{k=1}^{d-1} \{ |L(d_{k+1}) - L(d_k)| \}$$

که در این رابطه، L_0 بیانگر مجموع طول قطعات مسیر تا نقطه پیموده شده بوده و d_k نشان‌دهنده قطعه مسیر بین نقطه کنترل k ام و $k+1$ ام روی خم و $l(d_k)$ بیانگر طول قطعه مسیر بین دو نقطه کنترل اشاره شده است. پارامتر ψ نیز جهت تنظیم اهمیت طول پیموده شده به طول کل مسیر است که در اینجا برابر ۵ خواهد بود. مطابق این رابطه، هر دو قطعه مسیر متوالی از یکدیگر کسر شده و سپس مجموع تمام اختلافات محاسبه می‌گردد.

با توجه به محدودیت‌های فنی، در این مسئله با قیود مختلفی مواجه خواهیم بود. این قیود با توجه به محدودیت‌های ارتفاع پرواز و لزوم حفظ ایمنی سکو، زوایای چرخش، شیب سکو، نواحی ممنوعه و گستره مجاز پرواز تعیین شده است. در ادامه قیود پیاده‌سازی شده در این تحقیق تشریح شده است: ۱- قید کمینه ارتفاع پرواز (قید ارتفاع ایمن): قید نخست، مربوط به قید ارتفاع ایمن سکو است که به منظور پیشگیری از برخورد سکو با سطح منطقه و جهت حفظ سلامت سکو تا رسیدن به موقعیت هدف طراحی شده است. بر اساس این محدودیت، کمینه اختلافات ارتفاع نقاط کنترل (مؤلفه z_k) با مؤلفه سوم مدل رقمی زمین در آن نقطه (ارتفاع ثبت شده از محیط) باید بیشتر از ارتفاع ایمن h_{safe} باشد (رابطه (۶) را ببینید).

رابطه (۱)

$$p_1^{Bezier}(s) = \sum_{k=0}^n C_k^n (1-s)^{n-k} s^k p_{1,k}^{Control},$$

$$p_2^{Bezier}(s) = \sum_{k=0}^n C_k^n (1-s)^{n-k} s^k p_{2,k}^{Control},$$

$$p_3^{Bezier}(s) = \sum_{k=0}^n C_k^n (1-s)^{n-k} s^k p_{3,k}^{Control},$$

$$C_k^n = n! / k!(n-k)!, \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه، s پارامتری در بازه $(0, 1)$ ، نشان‌دهنده تعداد نقاط کنترل، $p_{1,k}^{Control}$ ، $p_{2,k}^{Control}$ و $p_{3,k}^{Control}$ بیانگر مؤلفه‌های مختصاتی k -امین نقطه کنترل است که مختصات روی خم p_1^{Bezier} ، p_2^{Bezier} و p_3^{Bezier} را می‌سازد.

با توجه به مأموریت‌هایی که در آن‌ها از UAS بهره‌گیری می‌شود و با توجه به نیازهای رایج برای این مسئله، صورت جامع مسئله بهینه‌سازی مقید به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

رابطه (۳)

$$\text{Minimize Cost} = \sum_{i=1}^2 k_i \text{Cost}_i, \quad k_1, k_2 \in [0, 1]$$

در مأموریت‌های مورد نیاز بهتر است تا سکو مسیر کوتاه‌تری را با توجه به اهداف و قیود طی کند. از این رو، تابع هدف مجموع مسافت پیموده شده، به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

رابطه (۴)

$$\text{Cost}_1 = \sum_{k=1}^{d-1} \sum_{e=1}^3 \left\{ \left\| p_{e,k+1}^{Bezier} - p_{e,k}^{Bezier} \right\|_2 \right\}$$

که در این رابطه، d بیانگر تعداد قطعات خم و $p_{e,k}^{Bezier}$ نشان‌دهنده مختصات نقاط روی خم است.

در همه مأموریت‌ها، هر چه مصرف انرژی سکو کمتر باشد، بهره‌وری عملیات افزایش خواهد یافت. از این رو، تابع هزینه دوم مربوط به کمینه‌سازی انرژی مصرفی در طی مسیر است. در اینجا فرض بر این است

رابطه (۶)

[۹]:

رابطه (۱۱)

$$s_k = \frac{z_{k+1} - z_k}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}},$$

۴- قید کمینه شیب خزشی: همچون قید مربوط به شیب بالاروی، شیب خزشی نیز باید کمتر از یک حد مجاز باشد. قید شیب خزشی در هر نقطه کنترل به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$g_\beta = \max(\beta_k - s_k) \geq 0, \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

رابطه (۱۳)

$$\beta_k = 2.50 \times 10^{-9} z_k^2 - 6.30 \times 10^{-6} z_k - 0.32,$$

۵- قید گستره مجاز: با توجه به اینکه محدوده هدف مشخص بوده و نیاز به مصرف کمترین انرژی و مسافت ممکن برای رسیدن به این نقطه است، حیطة اجرای مأموریت‌ها نیز اغلب محدود به یک گستره مجاز پرواز است. این قید به صورت رابطه (۱۴) طراحی شده است:

$$h_{map} = L_{outmap} = 0, \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در این رابطه L_{outmap} طول بخشی از قطعه مسیر است که بیرون ناحیه مجاز پرواز واقع شده باشد. در ادامه روش حل کارای این مسئله به وسیله الگوریتم پیاده‌سازی شده ارائه شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

در این بخش، الگوریتم رقابت استعماری^۱ به منظور اجرای جستجوی سراسری تشریح می‌شود که ایده اصلی آن با الهام گیری از رقابت‌های استعماری بین کشورهای جهان شکل گرفته است [۱۷]. این الگوریتم با جمعیتی تصادفی از کشورها در حالت اولیه شروع می‌گردد. این کشورها نیز در دو گروه امپریالیست

$$g_h = h_{safe} - \min(z_k - H_{terrain}(x_k, y_k)) \geq 0,$$

که در این رابطه h_{safe} پارامتر ایمنی جهت جلوگیری از برخورد سکو با سطح منطقه و $H_{terrain}$ نشان‌دهنده ارتفاع هر نقطه مسطحاتی بر اساس مدل رقمی منطقه است.

۲- قید بیشینه زاویه چرخش: بر اساس این قید، سکو باید در هر نقطه کنترل، بیشتر از یک مقدار مشخص، تغییر جهت ندهد. بر اساس قید بیان شده در رابطه (۷)، زاویه بیشینه چرخش (با توجه به مباحث مطرح در [۹]) باید در محدوده زیر باشد:

رابطه (۷)

$$g_\varphi = \max(\varphi_k - \varphi_k^{\max}) \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

در رابطه (۷)، φ_k^{\max} نشان‌دهنده بیشینه زاویه چرخش افقی در هر نقطه مسیر است که مطابق رابطه (۸) به فراخور بیشینه اضافه‌بار پهلویی n_{max} ، ثابت شتاب گرانش g و اندازه سرعت میانگین حرکت سکو V برآورد می‌گردد [۹].

رابطه (۸)

$$\varphi_k^{\max} = \frac{n_{max} g}{V} \left[(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 \right]^{1/2}$$

۳- قید بیشینه شیب بالاروی: با توجه به سنجنده‌ها نصب‌شده روی سکو، شیب بالاروی حرکت نباید بیشتر از یک حد مجاز باشد. شرط مناسب شیب بالاروی سکو بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$g_\alpha = \max(s_k - \alpha_k) \geq 0, \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹)، s_k نشان‌دهنده زاویه شیب سکو در نقطه کنترل شماره k بوده و α_k بیانگر زاویه بیشینه شیب بالاروی است که بر اساس معادله (۱۰) در هر نقطه کنترل تعیین می‌شود [۹]:

رابطه (۱۰)

$$\alpha_k = -1.53 \times 10^{-10} z_k^2 - 2.69 \times 10^{-5} z_k + 0.42,$$

همچنین s_k بر اساس رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد

¹ Imperialist Competitive Algorithm

سپس، هزینه نقاط کنترل مختلف بر اساس توابع هدف در روابط (۴ و ۵) محاسبه می‌گردد. بر اساس برانزنگی هر نقطه کنترل در ماتریس POP ، تعداد N_{imp} از بهترین سطرها به‌عنوان نقاط امپریالیست انتخاب شده و باقی N_{col} از مجموع N_{pop} عضو جمعیت اولیه به‌عنوان نقاط مستعمره وارد فرآیند بهینه‌سازی می‌شوند. در ادامه، مستعمره و امپریالیست نشان دهنده همان نقاط متناظر انتخاب شده به‌عنوان مستعمره و امپریالیست هستند.

جهت توزیع مستعمرات (باقیمانده نقاط اولیه) اولیه در بین امپریالیست‌ها (بهترین نقاط)، متناسب با قدرت (هزینه نرمال شده^۲) هر استعمارگر، تعدادی از مستعمرات را به هر امپریالیست می‌دهیم. بدین هدف، با محاسبه هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمال شده آن‌ها را به‌صورت بیان‌شده در معادله (۱۶) محاسبه می‌کنیم.

$$NC_n = f_{\text{cost}}^{(imp,n)} - \max_i (f_{\text{cost}}^{(imp,i)}), \quad (16) \text{ رابطه}$$

که در این رابطه، $f_{\text{cost}}^{(imp,n)}$ نشان‌دهنده هزینه n -امین امپریالیست بوده و NC_n بیانگر هزینه نرمال شده آن است. با توجه به هزینه نرمال شده، قدرت نسبی نرمال شده هر امپریالیست محاسبه شده و بر اساس آن، نقاط مستعمره بین نقاط امپریالیست تقسیم می‌شوند؛ بنابراین، بر اساس رابطه (۱۷)، تعداد اولیه نقاط مستعمره در کنترل یک نقطه امپریالیست برابر خواهد بود با

$$\text{رابطه (۱۷)}$$

$$NOC_n = \text{round} \left(\left| NC_n / \sum_{i=1}^{N_{imp}} NC_i \right| \times N_{col} \right),$$

که در آن NC_n ، تعداد اولیه نقاط مستعمره در یک امپراتوری و N_{col} نیز بیانگر تعداد کل نقاط مستعمره در جمعیت نقاط تصادفی اولیه است. تابع round نیز

و مستعمره قرار می‌گیرند که کشورهای استعمارگر با اجرای فرآیند جذب سیاسی (همگون‌سازی^۱)، کشورهای مستعمره را در زمینه‌های مختلف (جهت مختلف) به سمت خود جذب کرده یا آن را تضعیف می‌کنند. مجموع قدرت هر امپراتوری، وابسته به قدرت امپریالیست (به‌عنوان قدرت مرکزی) و مجموع مستعمرات آن خواهد بود [۱۸]. در کنار فرآیند جذب سیاسی، رقابت امپریالیستی بین کشورها از فرآیندهای اصلی الگوریتم است که پس از تشکیل امپراتوری‌های اولیه آغاز می‌شود. در صورتی که بر قدرت یک امپراتوری افزوده نشود و نتواند کشورهای بیشتری را به سیطره خود درآورد، از رقابت حذف می‌گردد [۱۷]. در ادامه، مراحل الگوریتم رقابت استعماری بر اساس مراجع [۱۷ و ۱۸] به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

۳-۱- شکل‌دهی امپراتوری‌های اولیه جهت حل مسئله

در مرحله نخست، جمعیتی تصادفی از نقاط کنترل اولیه در فضای مسئله تولید می‌شود. هر نقطه کنترل با سه مولفه در سیستم مختصات محلی، به‌عنوان یک کشور کد گردیده و در یک مسئله N -بعدی با N_{pop} نقطه کنترل به شکل یک آرایه $N_{pop} \times N$ بعدی ذخیره می‌شود.

$$\text{رابطه (۱۵)}$$

$$POP = \begin{bmatrix} \text{Country}_1 \\ \text{Country}_2 \\ \dots \\ \text{Country}_n \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P_{1,k}^{\text{Control}} \\ P_{2,k}^{\text{Control}} \\ \vdots \\ P_{N_{pop},k}^{\text{Control}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix}^T_{N_{pop} \times 3}$$

² Normalized Cost

¹ Assimilation

صورت نقطه ای که هزینه کمتری داشته باشد، مطابق رابطه (۱۸) به همگون سازی نقطه دیگر می‌پردازد.

۳-۴- قدرت کل یک امپراتوری

قدرت کل مجموعه ای از نقاط کنترل (امپراتوری) بر اساس قدرت کشور استعمارگر و مجموع قدرت مستعمرات تحت سلطه آن طبق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

رابطه (۲۰)

$$TC_n = f_{\text{cost}}^{(imp,n)} + \xi \cdot \left(\sum_{i=1}^{NC_n} f_{\text{cost}}^{(col,i)} \right) / NC_n,$$

در این رابطه TC_n بیانگر هزینه کل امپراتوری n -ام و ξ عددی مثبت بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵- رقابت استعماری

به منظور مدل سازی این پدیده، یک یا چند عدد از ضعیف ترین مستعمرات ضعیف ترین امپراتوری‌ها را جدا کرده و جهت تصاحب این مستعمرات، رقابتی بین کلیه امپراتوری‌ها ایجاد می‌شود. برای مدل سازی رقابت بین امپراتوری‌ها جهت تصاحب مستعمرات بیشتر، ابتدا احتمال تصاحب هر امپراتوری را متناسب با قدرت آن امپراتوری و با در نظر گرفتن هزینه کل آن محاسبه می‌شود. نخست بر مبنای هزینه کل امپراتوری، هزینه کل نرمال شده آن بر اساس رابطه (۲۱) تعیین می‌گردد.

$$NTC_n = TC_n - \max_i \{TC_i\}, \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در این رابطه TC_n ، هزینه کل امپراتوری n -ام و NTC_n نیز، هزینه کل نرمال شده آن امپراتوری است. هر امپراتوری که TC_n کمتری داشته باشد NTC_n بیشتری خواهد داشت. به تعبیری TC_n معادل هزینه کل یک امپراتوری و NTC_n معادل قدرت کل آن است. با داشتن هزینه کل نرمال شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمرات توسط هر امپراتوری به صورت رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری محاسبه می‌کند.

۳-۲- حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست

این مفهوم به کمک عملگر بیان شده در معادله (۱۸) مدل سازی می‌گردد. در الگوریتم مسیریابی متغیرهای مسئله در هر مرحله به صورت رابطه (۱۸) بروز رسانی می‌شوند:

رابطه (۱۸)

$$\left\{ P_{N_{pop},k+1}^{Control} \right\}_{new} = \left\{ P_{N_{pop},k}^{Control} \right\}_{old} + U \left(0, \beta \times \left\| \frac{P_{N_{pop},k}^{Imperialist} - P_{N_{pop},k}^{Colony}}{d} \right\| \right) \times \{h\}, \beta > 1,$$

که در آن d فاصله بین نقاط امپریالیست و مستعمره و β عددی بزرگ‌تر از ۱ و نزدیک به ۲ است. در مسیریابی متغیر جدید همان $(P_{N_{pop},k}^{Control})$ در تکرار جدید خواهد بود. بردار h نیز دارای طول واحد است به گونه‌ای که نقطه آغاز آن موقعیت پیشین یک نقطه کنترل و جهت آن به سمت امپریالیست باشد. از آنجاکه ممکن است انحرافات نیز در فرآیند استعمار رخ دهد، انحراف حرکت نقاط کنترل به صورت معادله (۱۹) محاسبه می‌شود

$$\theta \approx U(-\gamma, \gamma), \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که در این رابطه، γ پارامتری دلخواه است که افزایش آن موجب بهبود جستجوی نقاط نزدیک به امپریالیست شده و کاهش آن موجب نزدیکی بیشتر راستای حرکت مستعمرات به بردار d می‌شود.

۳-۳- جابجایی مکان مستعمره و امپریالیست

در صورتی که در اثر سیاست جذب نقاط کنترل به موقعیت بهتری نسبت به نقطه کنترل امپریالیست برسند، جای خود را با همدیگر تعویض می‌کنند. در این

نحوه کد کردن و مسئله حل شده برای دیگر مسائل بهینه سازی نیز معتبر است. در الگوریتم اصلی، هر نقطه کنترل به صورت تصادفی به سمت نقاط امپریالیست اطراف خود حرکت می کنند؛ بنابراین ممکن است پاسخ جاری به سمتی حرکت کند که به طور لزوم منطقه مناسبی برای جستجو نباشد. برای مثال، در صورتی که توزیع پاسخها در فضای مسئله به صورت یکنواخت نباشد، حرکت پاسخها به سوی دیگری که دورتر از نقطه بهینه سراسری باشد نیز ممکن است. این حرکت می تواند تنها به سوی نواحی مستعد فضای جستجو که احتمال یافتن پاسخ بهینه سراسری بیشتر است، باشد. بدین منظور، در راهکار پیشنهادی، حرکت کشورها (نقاط کنترل مورد جستجو) با توجه به نیروی استعماری نقاط کنترل دیگر صورت می گیرد. نیروی استعماری بین دو نقطه کنترل با رابطه بیان شده در معادله (۲۶) تعریف می شود.

رابطه (۱۶)

$$E_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{pop}} \frac{[P_i(t) \times P_j(t)] \times |X_j(t) - X_i(t)|}{(\|X_i(t), X_j(t)\|_2 + \varepsilon)^2 \times (t)^{1/2}}$$

که در این رابطه ε یک عدد بسیار کوچک است، $P_i(t)$ نشان دهنده قدرت کشور i ام، $P_j(t)$ نشان دهنده قدرت کشور j ام، $X_i(t)$ نشان دهنده موقعیت i امین نقطه کنترل در تکرار t ام و $X_j(t)$ نشان دهنده موقعیت j امین نقطه کنترل در تکرار t ام است. قدرت هر کشور بر اساس معادلات (۲۷) تا (۳۰) تعیین می گردد:

$$best(t) = \min_{i \in \{1, \dots, k\}} \{f_{cost}^{(country, i)}\}, \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$worst(t) = \max_{i \in \{1, \dots, k\}} \{f_{cost}^{(country, i)}\}, \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$P_i(t) = \frac{|f_{cost}^{(country, i)} - worst(t)|}{|best(t) - worst(t)|}, \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$P_i(t) = p_i(t) / \sum_{j=1}^k P_j(t), \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$P_{pn} = \left| \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \right|, \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

که برای کاهش بار محاسباتی الگوریتم در محاسبه این احتمالات، بردارهای (۲۳) تا (۲۵) تشکیل می شوند.

$$P = [P_{P1}, P_{P2}, \dots, P_{PN_{imp}}], \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

رابطه (۲۴)

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}}], \quad r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}} \approx U(0, 1),$$

رابطه (۲۵)

$$D = P - R = [P_R] = [D_1, D_2, \dots, D_{N_{imp}}] = [P_{P1} - r_1, P_{P2} - r_2, \dots, P_{PN_{imp}} - r_{N_{imp}}],$$

که P ماتریس احتمالات تصاحب امپریالیستها و R ماتریسی با اعضای تصادفی با توزیع یکنواخت است. بزرگترین درایه بردار D نشان دهنده کشور برنده خواهد بود.

۳-۶- سقوط امپراتوری های ضعیف

زمانی که یک امپراتوری تمام نقاط مستعمره تحت کنترل خود را از دست دهد، سقوط کرده و از جریان رقابت حذف خواهد شد.

۳-۷- همگرایی الگوریتم

در این شرایط خروجی الگوریتم لیست نقاط کنترل سه بعدی خواهد بود که در تکرار آخر، در ازای آن نقاط، طول و هزینه مسیر بهینه با توجه به قیود به کمترین مقدار رسیده است. با ترسیم خم بزیه گذرنده از نقاط کنترل به دست آمده بهترین مسیرهای ممکن تشکیل خواهند شد.

۴- استراتژی پیشنهادی جهت بهبود کارایی

الگوریتم با تعریف نیروی استعمار

در این نسخه، متناسب با قدرت هر کشور (در اینجا هر نقطه کنترل) یک نیروی جاذبه در نظر گرفته شده است. این الگوریتم مستقل از

سمت امپریالیست حرکت می‌کنند. با این استراتژی، با افزایش تکرارها، توان متمرکزسازی الگوریتم افزایش می‌یابد و توان متنوع سازی آن کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، امکان بهبود کارایی الگوریتم در رویارویی با مسائل پیچیده‌تر نظیر مسئله مسیریابی فراهم می‌شود. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل (۲) قابل مشاهده است.

در نهایت، موقعیت کشورها بر اساس معادلات (۳۱) تا (۳۳) تغییر می‌کند:

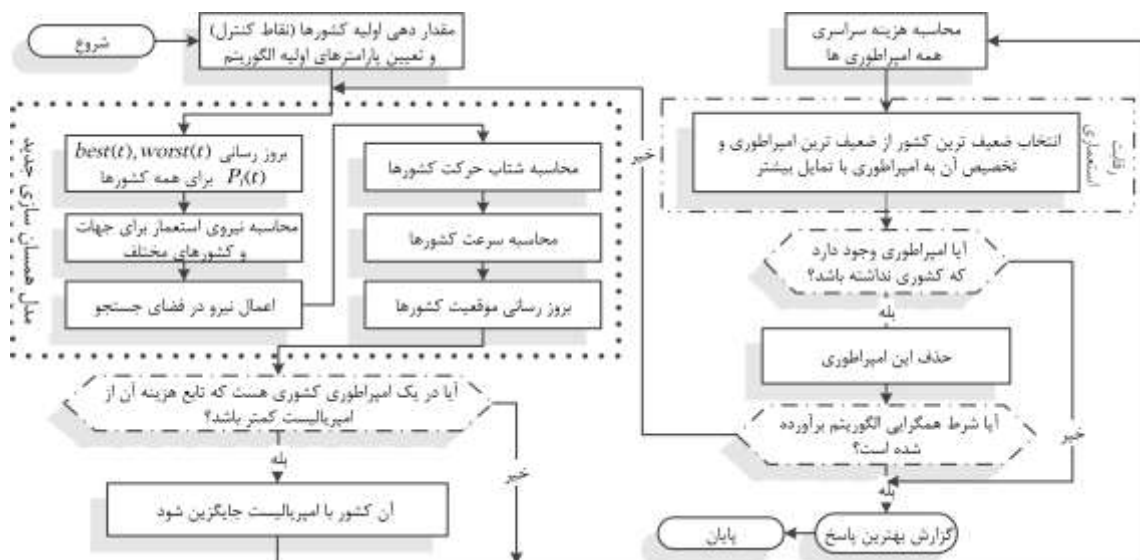
$$a_i^d(t) = E_i^d(t) / P_i(t), \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$v_i^d(t+1) = rand \times v_i^d(t) + a_i^d(t), \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$i = 1, \dots, N_{pop},$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + v_i^d(t+1), \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

مطابق با این روابط، با افزایش تکرارها، شدت نیروی استعمار کاهش می‌یابد و نقاط با شتاب کمتری به



شکل ۲: فلوجارت الگوریتم پیشنهادی رقابت استعماری (EICA)

الگوریتم با تئوری آشوب در گام همسان‌سازی بوده است. نسخه بهبودیافته دیگر موسوم به OICA در پژوهش [۱۹] ارائه شده و آن نسخه نیز با تغییر گام همسان‌سازی به‌دست‌آمده است. به‌منظور تحلیل زمان اجرا، دقت و کیفیت پاسخ‌ها تعداد تکرار هر الگوریتم جهت همگرایی به پاسخ‌های قابل‌اعتماد در سطح ۲۵۰ حلقه تنظیم شده است.

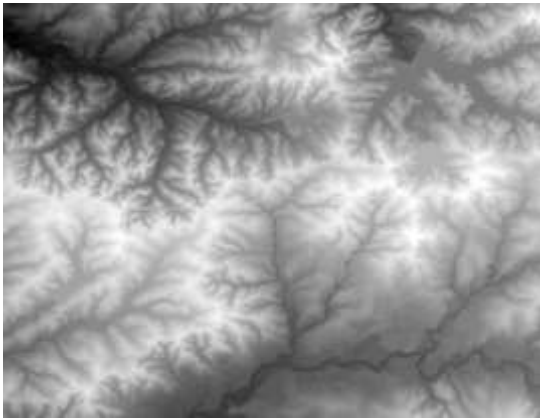
انتخاب پارامترهای الگوریتم‌ها به کارآزمودگی و مهارت کافی نیاز داشته و امکان تفاوت بهترین مقادیر برای پارامترها در هر مسئله وجود دارد. از این‌رو،

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج محاسباتی

در این بخش، نتایج برآمده از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله مطرح ارائه گردیده است. تمام پیاده‌سازی‌ها در شرایط برابر و در محیط نرم‌افزار متلب و رایانه‌ای دو هسته‌ای^۱ با توان ۱/۷ گیگاهرتز و حافظه داخلی یک گیگابایت اجرا شده است. جهت مقایسه از دو نسخه دیگر الگوریتم رقابت استعماری بهره‌گیری شده است. نسخه نخست موسوم به CICA، در تحقیق [۱۹] ارائه گردیده که مبتنی بر ترکیب

^۱ Intel Dual Core

نتایج یکسان است. از آنجاکه عملکرد الگوریتم‌ها باید در همه محیط‌ها و با هر مقدار اولیه‌ای با ثبات^۲ باشد، تغییر مقادیر انحراف از معیار و سرعت نسبی الگوریتم‌ها را تغییر نمی‌دهد. از این رو، انتخاب مقادیر این پارامترها با توجه به شرایط هر مأموریت متغیر است و از آنجاکه میانگین‌گیری نیز انجام شده است، مقدار آن‌ها تأثیر ملموسی در سرعت نسبی و دقت نسبی روش‌های آزمایش شده نخواهد داشت. در انتخاب داده‌های اولیه مأموریت سعی بر آن بوده تا شبیه‌سازی تا حد ممکن به واقعیت نزدیک‌تر باشد. مدل رقمی مورد استفاده نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر مدل رقمی مورد استفاده در محیط شبیه‌سازی

شرط توقف تمامی الگوریتم‌ها هم بر مبنای تعداد تکرارها و هم بر مبنای دقت پاسخ‌ها بوده است. به کارگیری همزمان این دو معیار به این دلیل است که توقف الگوریتم پس از تعداد تکرار مشخصی از الگوریتم تضمین شود؛ بدین منظور، شرط توقف حلقه اصلی مطابق با شرط ارائه شده در معادله (۳۴) طراحی شده است:

رابطه (۳۴)

$$\sum_{d=1}^{Dim} (U_i^{gb} - U_i^B)^2 \leq (L_{max} - L_{min}) \times 10^{-3},$$

^۲ Robust

با استفاده از تحلیل تاکوچی^۱، مناسب‌ترین پارامترهای اولیه برای الگوریتم‌ها انتخاب شده‌اند. جهت کاهش وابستگی هرچه بیشتر الگوریتم‌ها نسبت به نحوه انتخاب پارامترهای اولیه، میانگین اجراهای مستقل متعدد محاسبه شده است. در جدول (۲) نیز، مقادیر به دست آمده از تحلیل تاکوچی برای الگوریتم‌های مورد بررسی گزارش شده است. الگوریتم‌های مورد بررسی با این مقادیر بهترین عملکرد را در مقایسه با مقادیر اولیه دیگر ارائه می‌کنند.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مورد مقایسه

مقادیر	پارامترها
۱۰	تعداد امپریالیست‌ها (N_{imp})
۲	ضریب همسان‌سازی (β)
۰/۱	ضریب میانگین هزینه کلونی‌ها (ζ)
۰/۳	نرخ انقلاب (μ)
۰/۷	ضریب زاویه همسان‌سازی (γ)

جهت مسیریابی در یک مأموریت نمونه همچون انتقال کالا و خدمات پزشکی، از داده‌های واقع‌گرایانه استفاده شده است تا بهترین مسیرها برای یک منطقه که مدل رقمی آن موجود است، محاسبه گردد. مدل رقمی مورد استفاده در منطقه‌ای به مساحت 80×80 کیلومتر مربع واقع شده و یک نقطه به‌عنوان مختصات مجروح (هر نقطه هدفی در مأموریت‌های دیگر) در سیستم محلی در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود سکو قادر به حرکت با سرعت میانگین ۴۰ کیلومتر بر ساعت باشد. از این رو، پارامترهای شبیه‌سازی مأموریت بدین صورت تنظیم گردیده است: ابعاد منطقه حرکت 80×80 کیلومتر مربع، میانگین سرعت مجاز V برای پرنده برابر با 40 km/h ، n_{max} برابر ۶، تعداد ۶۰ نقطه کنترل برای محاسبه خم‌های بزیه، شتاب گرانش g برابر $9/81 \text{ m/s}^2$ ، پارامترهای وزن دهی k_1 و k_2 برابر با $0/5$ ، n_{safe} برابر ۳ متر. مقادیر k_1 و k_2 برابر نشان‌دهنده این امر است که تأثیر توابع هزینه در

^۱ Taguchi

تکرارهای متوالی کمتر از یک‌هزارم باشد، یا تعداد تکرارها به صد تکرار برسد و یا اختلاف بهترین مقدار یافت شده و بدترین (دورترین پاسخ از بهینه سراسری) پاسخ یافت شده کمتر از یک‌هزارم باشد، الگوریتم متوقف می‌شود. بر این مبنا، شبه کد شرط توقف ترکیبی می‌تواند به صورت (۳۵) طراحی و جهت ارزیابی الگوریتم‌ها به کار گرفته شود.

If the average improvement of best(i) is below 0.001
for i=1:100 generations,
check if maximum distance (best(i)-worst(i)) ≤ 0.001
if not, break and return
the best, mean, worst, std, time

رابطه (۳۵)

میانگین‌گیری روی ۵۰ بار تکرار شبیه‌سازی‌ها با تنظیمات اولیه یکسان و با در نظر گرفتن کلیه قیود به‌دست آمده‌اند.

۵-۱- بررسی کارایی از منظر دقت و کیفیت

عملکرد الگوریتم‌های ICA و EICA، از دید کیفیت و دقت نتایج، زمان اجرا و نرخ موفقیت در جدول (۳) مقایسه شده است. نتایج ارائه شده در جدول (۳) بعد از

جدول ۳: مقایسه عملکرد الگوریتم رقابت استعماری و نسخه‌های بهبود یافته

آن از دید کیفیت نتایج و زمان اجرای شبیه‌سازی مأموریت سکو با تمام قیود در سناریوی مطرح شده

رتبه	میانگین زمان اجرا (ثانیه)	انحراف از معیار	بدترین	میانگین	بهترین	الگوریتم
۴	۲۱/۹	۱۶/۱۰۴	۴۴۲/۰۱۲	۴۳۳/۲۰۱	۴۲۴/۲۳۷	ICA
۳	۲۰/۱	۲۱/۰۰۲	۴۴۵/۰۹۰	۴۲۸/۷۱۶	۴۳۰/۸۵۰	OICA
۲	۱۸/۷	۱۹/۰۵۷	۴۵۹/۵۲۰	۴۳۹/۰۳۵	۴۳۶/۱۰۹	CICA
۱	۱۶/۲	۰۸/۲۹۹	۴۴۵/۲۶۳	۴۲۱/۸۲۵	۴۲۰/۷۰۰	EICA

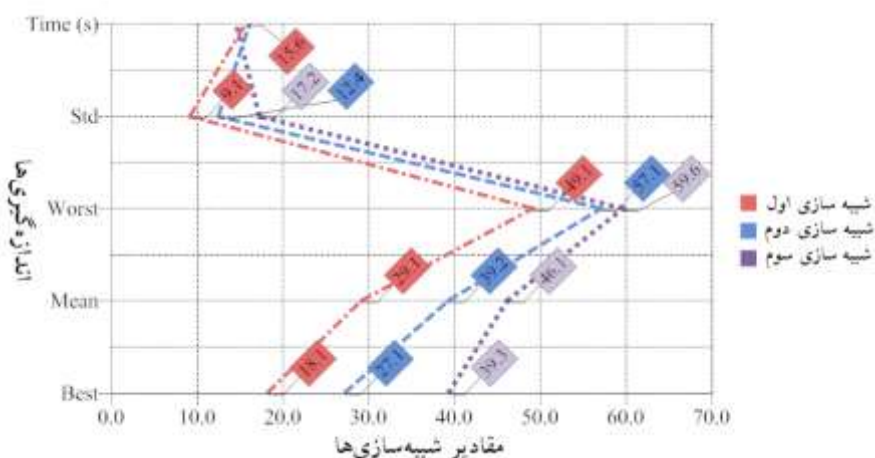
OICA قادر به یافتن مسیرهای مطلوب‌تری بوده است. مقایسه نتایج الگوریتم EICA با روش استاندارد و الگوریتم‌های OICA و CICA مبین سرعت محاسبات بالا و دقت بیشتر روش پیشنهادی است.

جهت بررسی کیفیت مسیرهای محاسبه شده، با اجرای ۳ شبیه‌سازی مستقل با قیود مکانی، ارتفاعی و دینامیکی مختلف، میزان حساسیت و انعطاف‌پذیری الگوریتم پیشنهادی نسبت به تغییر قیود مورد ارزیابی واقع شد. در شبیه‌سازی اول، حل مسئله صرفاً با در نظر گرفتن قیود ارتفاعی و مکانی (۶) و (۱۴)

با دقت در نتایج جدول (۳)، برتری الگوریتم جدید نسبت به روش اصلی در بهترین مقدار یافت شده، میانگین و بدترین هزینه، انحراف از معیار و میانگین زمان اجرای الگوریتم مشخص می‌گردد. کمتر بودن انحراف از معیار پاسخ‌های روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم اصلی می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که توان متمرکز سازی الگوریتم بهبود یافته است. همچنین از مقایسه نتایج OICA و CICA می‌توان مشاهده نمود که الگوریتم آشوبی CICA دارای انحراف از معیار و زمان محاسبات کمتری نسبت به الگوریتم دیگر است، اما با توجه به میانگین هزینه‌ها، الگوریتم

جهت تسهیل در مقایسه‌ها از آن‌ها کسر شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که برآیند کیفیت و دقت نتایج شبیه‌سازی اول به ترتیب بهتر از شبیه‌سازی‌های دوم و سوم است. با توجه به بیشتر بودن میزان بار و خطای محاسباتی موجود در داده‌های دینامیکی، هر چه قيود دینامیکی بیشتری در مدل‌سازی لحاظ شود، دقت نتایج کمتر و زمان اجرا بیشتر می‌شود.

انجام‌شده و در شبیه‌سازی دوم، قيود ارتفاعی، مکانی (۶) و (۱۴) و تنها یک قيود دینامیکی بیشینه زاویه چرخش (۷) در محاسبات لحاظ شده است. در نهایت، شبیه‌سازی سوم صرفاً با در نظر گرفتن محدودیت‌های دینامیکی (۷)، (۹) و (۱۲) اجرا شده است. شکل (۴) نشان‌دهنده نمودار کیفیت، دقت و سرعت محاسباتی الگوریتم EICA در مجموع شبیه‌سازی‌های سه‌گانه است. در مقادیر مربوط به هزینه مسیره‌ها، قسمت مشترک (۴۰۰ واحد)



شکل ۴: مقایسه عملکرد الگوریتم EICA با قيود مختلف در شبیه‌سازی‌های سه‌گانه

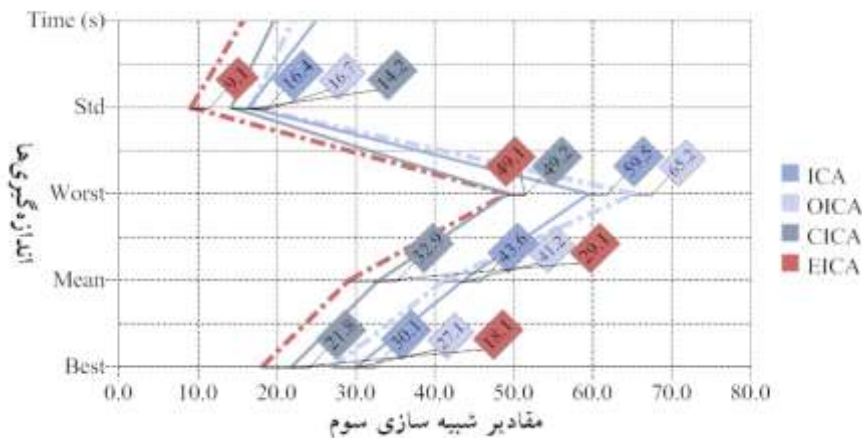
ارتقای ظرفیت متمرکز سازی الگوریتم اصلی داشته است.

۵-۲- مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از منظر استحکام

یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها بررسی تعداد دفعات اجرای موفق الگوریتم در حل مسئله است [۲۲]. در مسئله بهینه‌سازی مسیر UAS حد آستانه موفق بودن یک اجرا می‌تواند با توجه به دقت مورد نیاز تعیین گردد. معادله این شاخص پیش از این عنوان گردید. نرخ موفقیت و مجموع زمان اجرای روش‌های پیاده‌سازی شده در طی ۵۰ شبیه‌سازی مستقل با تنظیمات یکسان در جدول (۴) گزارش شده است. با توجه به نتایج این جدول، دفعات موفقیت الگوریتم EICA به ترتیب به میزان

این رفتار مستقل از نوع و عملگرهای الگوریتم‌های مورد استفاده بوده و به صورت مشابهی در نتایج سایر الگوریتم‌ها نیز مشاهده می‌شود. در شکل (۵)، نتایج شبیه‌سازی سوم برای تمامی الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۵) مشاهده می‌شود، سطح زیر نمودار الگوریتم پیشنهادی با محور عمودی کمتر از سایر الگوریتم‌ها بوده و نتایج الگوریتم‌های OICA، CICA و ICA نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل (۴) و (۵) مشاهده می‌شود که زمان محاسبات و دقت پاسخ‌ها بهبود بیشتری یافته و در نتیجه عملگر فیزیکی به کار گرفته شده در گام همسان‌سازی، تأثیر قابل توجهی در تعدیل همگرایی زودرس و

۱۱،۶ و ۱۵ مرتبه بیشتر از روش‌های ICA، OICA و CICA بوده است.



شکل ۵: مقایسه عملکرد الگوریتم EICA با الگوریتم‌های دیگر در شبیه‌سازی سوم

سایر روش‌های مورد مطالعه ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این سناریو سعی شده است تا نقاط دور از دسترس با توجه به مدل رقمی انتخاب شوند تا توانایی الگوریتم‌ها در تأمین اهداف مسئله به خوبی سنجیده شود. با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت که مسیرهای تولیدشده توسط روش پیشنهادی از لحاظ کیفی کوتاه‌تر و هموارتر از مسیرهای الگوریتم استاندارد و دیگر روش‌ها هستند. با توجه به شکل (۶)، در هندسه محیطی پیچیده‌تر، بهترین مسیر تولیدی توسط الگوریتم رقابت استعماری نتوانسته قید ارتفاع ایمن را برآورده کند و با سطح برخورد نموده، بنابراین پاسخ محاسبه شده، ممکن و معتبر^۱ نیست. از سوی دیگر، نتایج استراتژی جدید نشان می‌دهد که بهترین، میانگین و بدترین پاسخ‌ها به خوبی محدودیت ارتفاعی را برآورده کرده‌اند و معتبر هستند. در شکل بعد، بهترین مسیر تولیدی الگوریتم CICA در مجموع شبیه‌سازی‌های متعدد با رنگ سفید مشخص شده است. این مسیر دارای کمترین مصرف انرژی بوده اما از لحاظ مسافت پیموده شده در رتبه دوم قرار می‌گیرد. همچنین نتایج الگوریتم OICA

هم‌چنین، زمان اجرا در مجموع ۵۰ شبیه‌سازی متعدد همچنان به میزان ۲۳۰ ثانیه بهتر از الگوریتم استاندارد بوده است. کاهش زمان اجرا نیز به دلیل افزایش سرعت محاسبات در اثر عملگرهای پیشنهادی الگوریتم در جستجوی محیط مسئله است. در نسخه جدید، با افزایش توان متنوع سازی پاسخ‌ها، فرآیند همگرایی سریع‌تر از روند الگوریتم اصلی و سایر الگوریتم‌ها با یافتن ناحیه مستعد مسئله به اتمام رسیده است. در حالی که در نسخه استاندارد بخشی از زمان اجرا، صرف اجرای جستجوی هدایت نشده در نواحی غیر مستعد فضای پاسخ‌ها می‌شود. در مجموع، روش تعدیل‌شده دارای بیشترین نرخ موفقیت و کمترین بار محاسباتی بوده است.

جدول ۴: مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس نرخ موفقیت در مجموع ۵۰ اجرای متعدد

الگوریتم	ICA	OICA	CICA	EICA
دفعات موفقیت	۳۶	۴۱	۳۲	۴۷
درصد استحکام	۷۲	۸۲	۶۴	۹۴
زمان اجرا	۱۰۵۱/۷۰	۱۰۱۱/۸۵	۹۸۹/۱۸	۸۲۱/۱۲

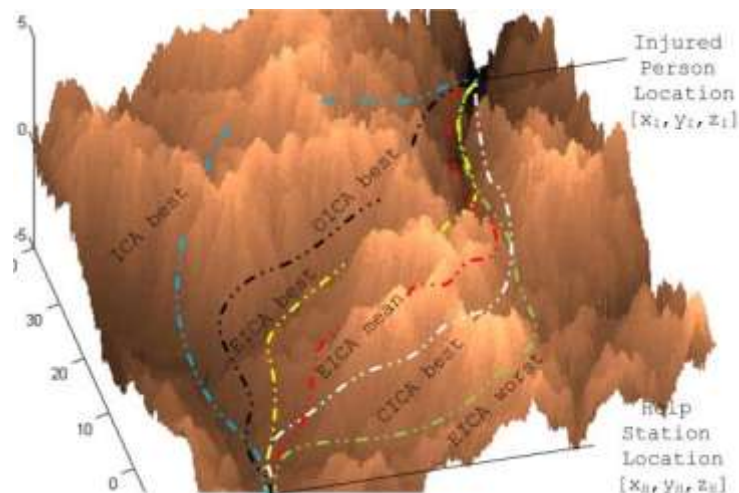
۵-۳- بررسی خطوط سیر محاسبه شده

در این بخش خم‌های بزیه نهایی گذرنده از بهترین نقاط یافت شده توسط الگوریتم پیشنهادی و

^۱ Feasible

تأمین اهداف، نمی‌تواند از بالای سطح عبور کند.

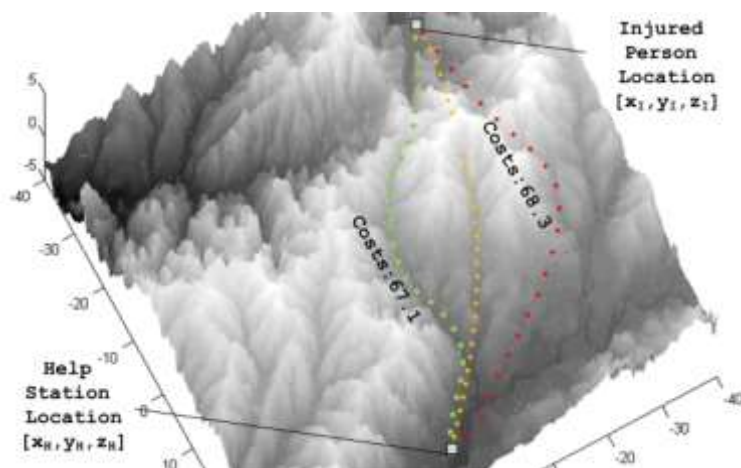
نشان می‌دهد که مسیره‌های محاسبه‌شده توسط روش مذکور ممکن و معتبر نیست، زیرا برخلاف



شکل ۶: مقایسه مسیره‌های تولیدشده به وسیله الگوریتم‌های مورد بررسی

بین نقاط شروع و پایان باشد که توسط الگوریتم بهبودیافته EICA و بدون در نظر گرفتن محدودیت ارتفاع ایمن تولید گردیده است. به همین دلیل بخشی از مسیر نیز با سطح مدل رقمی برخورد کرده است. خم سبزرنگ نیز توسط الگوریتم بهبودیافته EICA طراحی شده، با این تفاوت که محدودیت ارتفاع ایمن به‌عنوان یک قید مسئله در نظر گرفته شده است. خم قرمز نیز خم ترسیم‌شده توسط الگوریتم استاندارد ICA با در نظر گرفتن ارتفاع ایمن است.

گاهی در برخی سناریوها، چندین راه‌حل بهینه برای یک پیکربندی خاص قابل محاسبه‌اند. این‌گونه مسیره‌ها، برای محک قابلیت اعتماد الگوریتم‌ها مناسب‌اند. در صورتی که الگوریتم کارا باشد، قادر خواهد بود بین راه‌حل‌های برتر نیز، بهترین خروجی ممکن را محاسبه کند. در شکل (۷) حالت خاصی نشان داده شده است که هر سه مسیر دارای هزینه نزدیک به یکدیگر هستند. خم نارنجی شاید نزدیک‌ترین خم در دسترس نسبت به خط واصل



شکل ۷: نمایش خم‌های محاسبه‌شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی

دایکسترا، کوتاه‌ترین مسیر ممکن با عبور از گره‌های: ۱-۳-۸-۱۴-۲۰ و با هزینه ۱۴۲ قابل محاسبه است. بر این اساس، مشخص می‌شود که الگوریتم استاندارد و دیگر نسخه‌های ارائه شده تنها قادر به یافتن مسیرهایی زیر بهینه بوده‌اند، این مهم در حالی است که الگوریتم پیشنهادی قادر به تعیین دقیق مسیر بهینه بوده و نتایج آن با مسیر یافت شده توسط الگوریتم کلاسیک دایکسترا یکسان است. همچنین، الگوریتم جدید دارای هزینه دقیق تری و کمتری نسبت به نسخه‌های پیشین بوده است.

۶- نتایج و پیشنهادها

سکوه‌های پرنده از پتانسیل بالایی در ارائه خدمات مکانی برخوردار هستند، برای مثال، پس از وقوع حوادث و تصادفات، انجام مأموریت امداد در کمترین زمان ممکن به یک هدف حیاتی در رسیدگی به وضعیت مصدومان تبدیل می‌شود. در سال‌های اخیر، کشورهای توسعه‌یافته و درحال توسعه شاهد رشد روزافزون به‌کارگیری فناوری UAS در زمینه‌های مختلف خدمات مکان‌مبنا از جمله اورژانس و امداد و نجات مجروحان بوده‌اند. در این حیطه، مسئله مسیریابی UAS همواره به‌عنوان یکی از ضروریات دستیابی به نوابری خودکار سکوها مطرح بوده است. به عنوان یک نمونه قابل استفاده و سودآور، در سناریوهای انتقال کالای پزشکی، پس از تشخیص موقعیت مجروح، UAS می‌تواند به همراه سنجنده‌های تصویری و کمک‌های اولیه پزشکی در کمترین زمان به محل ارسال شود. در این مقاله، یک رهیافت کارا جهت مسیریابی سکوها در سناریوهای مختلف ارائه شده که می‌تواند در این کاربرد هم به کارگرفته شود. ابتدا با توجه به محدودیت‌ها و اهداف مسئله، توابع هدف فاصله و انرژی سکو و قيود مختلفی شامل زوایای چرخش و ارتفاع ایمن سکو به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه مدل‌سازی شدند.

با توجه به این شرایط، الگوریتم بهبودیافته توانسته بهینه‌ترین مسیر ممکن را با حفظ ایمنی سکو محاسبه کند. خم سبزرنگ با مقدار ۶۷/۱ واحد کمترین هزینه و خم قرمزنگ با مقدار ۶۸/۳ واحد بیشترین هزینه را در بین سه خم دارد؛ بنابراین، استراتژی تعدیل شده قادر است تا خم‌های قابل‌اعتماد و بهینه‌ای را با توجه به محیط و وجود یا عدم وجود محدودیت‌ها محاسبه نماید، درحالی‌که الگوریتم اصلی از بین این سه راه حل برتر، در هر صورت قادر به یافتن خمی بهتر از خم قرمز نبوده است.

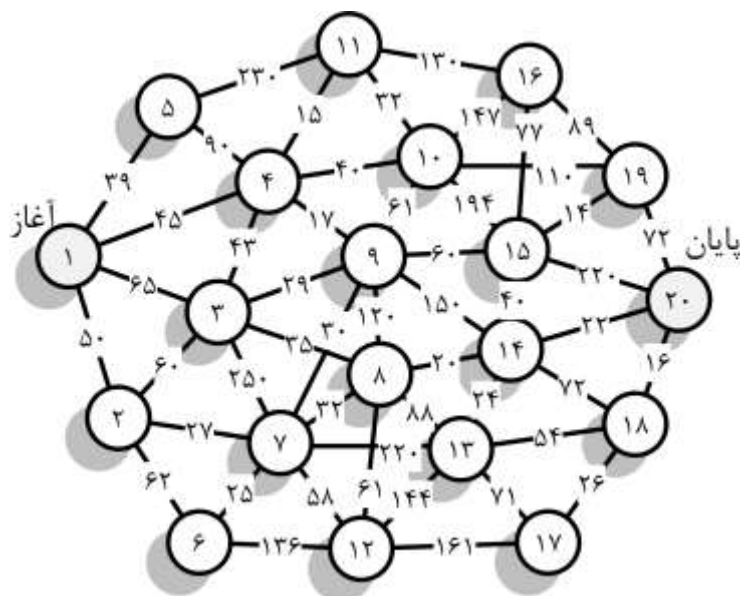
۵-۴- مقایسه الگوریتم‌ها در یک مسئله نمونه

جهت بررسی بیشتر توانایی و دقت الگوریتم‌ها، یک مأموریت ساده با پارامترهای تقلیل یافته بررسی شده است. با تقلیل در مدلسازی و صرف نظر از پارامترهای دخیل، این مسئله می‌تواند از منظر ریاضی به یک مسئله کوتاه‌ترین مسیر در روی یک گراف دو بعدی با وزن یال‌های معلوم و ۲۰ گره تبدیل شود. توپولوژی این شبکه در شکل (۸) نشان داده شده است. تابع هدف این مسئله می‌تواند بدین صورت تعیین گردد:

$$f_i = \left(\sum_{j=1}^{N_i-1} \text{Cost}_{ik} \right)^{-1},$$

$$t = PP^i(j), k = PP^i(j+1) \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

که در این رابطه، PP^i بیانگر مجموعه توالی شناسه گره‌های i امین عامل جستجو، PP^i نشان دهنده تعداد کل گره‌های واقع در مسیر مورد جستجو و Cost_{ik} هزینه بخش‌هایی را نشان می‌دهد که گره t را به k متصل می‌کنند [۲۱]. الگوریتم‌های OICA، ICA، EICA و CICA برای این مسئله، مسیرهایی به ترتیب با هزینه‌های زیر پیدا کرده‌اند: ۲۳۴، ۱۸۷، ۱۸۷، ۱۴۲. مجموعه گره‌های یافت شده به وسیله این الگوریتم‌ها بدین صورت بوده است: (الف) ICA: ۱-۴-۹-۲۰، (ب) OICA: ۱-۳-۸-۱۴-۲۰، (ج) OICA: ۱-۲-۳-۸-۱۴-۲۰، (د) EICA: ۱-۳-۸-۱۴-۲۰. در حالی است که بر مبنای اجرای الگوریتم کلاسیک



شکل ۸: یک شبکه نمونه با ۲۰ گره به همراه وزن یال ها

بوده‌اند و الگوریتم جدید قادر است تا در نقاط دور از دسترس نیز عملکرد مطلوبی را به نمایش گذارد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که به‌کارگیری عملگرهای طراحی شده موجب بهبود عملکرد روش اصلی را از منظر متنوع سازی و متمرکزسازی گردیده است. با توجه به زیرساخت‌های موجود در ایران، استراتژی پیشنهادی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود کارایی و کیفیت بخشی مأموریت‌های انتقال کالا و خدمات پزشکی با UAS داشته باشد. در کارهای آینده می‌توان عملکرد الگوریتم جدید را در حل دیگر مسائل مسیریابی در نظر گرفت. همچنین می‌توان در سناریوها و مدل‌سازی‌های دیگر و با افزایش تعداد سکوها و با در نظر گرفتن قیود جدید عملکرد روش‌ها را بررسی نمود.

سپس به طراحی یک نسخه بهبودیافته الگوریتم رقابت استعماری با بهره‌گیری از فیزیک گرانش پرداخته شد. سپس، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله و در رقابت با روش اصلی و دو روش بهبودیافته از تحقیقات قبلی سنجیده شد.

تحلیل نتایج مسیریابی مبین بهبود کارایی الگوریتم پیشنهادی از منظر کیفیت و دقت مسیرها در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی است. نتایج نشان می‌دهد روش تلفیقی با فیزیک گرانش در زمان اجرای کمتری مسیرهای بهینه را یافته است. ارزیابی روش‌ها از منظر استحکام و نرخ موفقیت نیز تأییدکننده بهبود روش پیشنهادی به میزان ۲۲ درصد نسبت به الگوریتم اصلی در مجموع ۵۰ شبیه‌سازی مستقل است. پس از بررسی بهترین مسیرهای تولیدی هر الگوریتم، مشاهده شد که مسیرهای محاسبه‌شده ممکن و معتبر

مراجع

- [1] A. Carrara, F. Guzzetti, M. Cardinali, and P. Reichenbach, "Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard" *Natural hazards*, vol. 20, pp. 117-135, 1999.
- [2] E. Peeters, E. Teller, W.G Patrick, S. Brin, "Providing a medical support device via an unmanned aerial vehicle" U.S. Patent: US: 8 948 935, issued date Feb 3, 2015
- [3] E. Ayati & E. Abbasi, "Investigation on the role of traffic volume in accidents on urban highways." *Journal of safety research*, vol.

- 42(3), pp. 209-214, 2011.
- [4] H. Helble & S. Cameron, "OATS: Oxford aerial tracking system." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55(9), pp. 661-666, 2007.
- [5] W. Duan, G. Chen, Q. Ye, & Q. Chen, "The situation of hazardous chemical accidents in China between 2000 and 2006." *Journal of hazardous materials*, vol. 186(2), pp.1489-1494, 2011.
- [6] E. Besada-Portas, L. De La Torre, A. Moreno, and J. L. Risco-Martín, "On the performance comparison of multi-objective evolutionary UAV path planners," *Information Sciences*, vol. 238, pp. 111-125, 2013.
- [7] C. Zheng, L. Li, F. Xu, F. Sun, and M. Ding, "Evolutionary route planner for unmanned air vehicles," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 609-620, 2005.
- [8] X. Zhang and H. Duan, "An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning," *Applied Soft Computing*, vol. 26, pp. 270-284, 2015.
- [9] E. Besada-Portas, L. de la Torre, J. M. de la Cruz, and B. de Andrés-Toro, "Evolutionary trajectory planner for multiple UAVs in realistic scenarios," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 619-634, 2010.
- [10] J. M. de la Cruz, E. Besada-Portas, L. Torre-Cubillo, B. Andres-Toro, and J. A. Lopez-Orozco, "Evolutionary path planner for UAVs in realistic environments," in *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2008, pp. 1477-1484.
- [11] H. Duan, Y. Yu, X. Zhang, and S. Shao, "Three-dimension path planning for UCAV using hybrid meta-heuristic ACO-DE algorithm," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, pp. 1104-1115, 2010.
- [12] Y. Fu, M. Ding, and C. Zhou, "Phase angle-encoded and quantum-behaved particle swarm optimization applied to three-dimensional route planning for UAV," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 511-526, 2012.
- [13] V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 132-141, 2013.
- [14] Y. Fu, M. Ding, C. Zhou, and H. Hu, "Route planning for unmanned aerial vehicle (UAV) on the sea using hybrid differential evolution and quantum-behaved particle swarm optimization," *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 1451-1465, 2013.
- [15] D. Alejo, J. Cobano, G. Heredia, and A. Ollero, "Collision-free trajectory planning based on Maneuver Selection-Particle Swarm Optimization," in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 72-81.
- [16] G. Farin, *Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide*: Elsevier, 2014.
- [17] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition," in *Evolutionary computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, 2007, pp. 4661-4667.
- [18] T. Niknam, E. T. Fard, N. Pourjafarian, and A. Rousta, "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, pp. 306-317, 2011.
- [19] S. Talatahari, BF. Azar, R. Sheikholeslami, and AH. Gandomi, "Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 17, pp. 1312-1319, 2012.
- [20] A Kaveh, S Talatahari, "Optimum design of skeletal structures using imperialist

- competitive algorithm," Computer Structures, vol. 88, pp.1220–1229, 2010.
- [21] A. Mohemmed, N. Sahoo and T. Geok, "Solving shortest path problem using particle swarm optimization," Applied Soft Computing, vol. 8, no. 4, pp. 1643-1653, 2008.
- [22] AA Heidari, RA Abaspour, AA Jordehi, "An efficient chaotic water cycle algorithm for optimization tasks," Neural Computing and Applications, doi: 10.1007/s00521-015-2037-2.



An Efficient UAS Path Planning Strategy Based on Improved Imperialist Competitive Algorithm

Ali Asghar Heidari¹, Rahim Ali Abaspour*²

1- PhD student in GIS, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran
2- Assistant professor, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran

Abstract

Daily growth of unmanned aerial systems (UAS) technology in areas related to geospatial sciences and location-based services makes it easy to employ them in digital photogrammetry, environment monitoring, infrastructures, sensitive constructions and medical support and aid delivery tasks. In this area, fast and efficient development in UAS path planning can enhance the productivity, efficiency and quality of these missions. In this research, an efficient UAS path planning strategy is proposed based on the imperialist competitive optimization algorithm, which can improve the productivity and autonomy of different missions in new challenges such as medical support and aid delivery scenarios. For this purpose, first, with respect to the objectives and restrictions of the scenario, a single objective constrained optimization model is designed. Then, to intensify the exploration and exploitation capabilities of imperialist competitive algorithm, the assimilation step is integrated with gravity physics. In simulation phase, the results obtained by proposed method has been compared to the results of the other variants of this method with respect to the quality, standard deviation, running time, success rate and quality of the computed paths. The assessment in multiple simulations verifies the efficiency and robustness of the proposed strategy and quality of the obtained paths in studied scenario.

Key words: Imperialist Competitive Algorithm, Unmanned Aerial Systems, Path Planning, Medical Supports

Correspondence Address : GIS Division, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran.
Tel : +98 9123011255
Email : abaspour@ut.ac.ir