

پایش مخاطرات مناطق زلزله زده با بهره‌گیری از پرنده‌های بدون سرنشین بر مبنای الگوریتم فرااکتشافی پیشنهادی GPO



علی اصغر حیدری (as_heidari@ut.ac.ir)

کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی، گروه مهندسی نقشه‌برداری،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

رحیم‌علی عباسپور*

استادیار مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۱۴ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۴/۲/۳۰)

چکیده

پس از رخداد زلزله، اغلب، نقشه به‌هنگام و قابل‌اعتمادی از محیط در دسترس نیست، زیرساخت‌های زمینی مجهز نیستند یا ویران شده‌اند و زمان به عاملی حیاتی برای مدیریت مخاطرات، جست‌وجو و اکتشاف مجروحان زیر آوار تبدیل می‌شود. از این‌رو، مدیریت مخاطرات و پایش مناطق زلزله‌زده یکی از بارزترین زمینه‌هایی است که به‌کارگیری سیستم‌های خودکار موجب کیفیت‌بخشی مأموریت‌های امدادسانی و بهبود بازدهی عملیات جست‌وجو می‌شود. به‌کارگیری پرنده‌های بدون سرنشین به‌عنوان سکوه‌های حامل سنجنده‌های چندمنظوره در پایش ویرانی‌های برآمده از زلزله به رویکردی نوین و اقتصادی با هدف ارتقای خودکاری، بهره‌وری و کارایی مدیریت مخاطرات طبیعی تبدیل شده است. روند تکامل پرنده‌های بدون سرنشین از سیستم‌های کنترل‌شونده از راه دور به سمت نوابری خودکار یا ترکیبی است. در این زمینه، توسعه الگوریتم‌های جامع، کارآمد و پایدار برای مسیریابی، کنترل، نوابری و پردازش اطلاعات سنجنده‌های پرنده‌های بدون سرنشین، به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین گام‌ها در توسعه سیستم‌های خودکار مورد توجه پژوهشگران است. در این پژوهش، یک الگوریتم فرااکتشافی جدید براساس مفاهیم گرانی‌سنجی در ژئودزی فیزیکی پیشنهاد شده است. هدف از طراحی این الگوریتم جدید دستیابی به روشی کارا تر در حل مسائل پیچیده با قیود مختلف نظیر مسائل مطرح در زمینه پایش مخاطرات است. ارزیابی دقت و کیفیت نتایج، نرخ موفقیت و همچنین زمان اجرای الگوریتم‌های پیاده‌شده، مبین کسب نتایج برتر الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین در شبیه‌سازی پایش مناطق زلزله‌زده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی پتانسیل ثقل، پرنده‌های بدون سرنشین، تکامل تفاضلی، توده ذرات، زنبورعسل مصنوعی، محاسبات تکاملی.

مقدمه

ایران از جمله مناطق حادثه‌خیز جهان است که بسیاری از مخاطرات طبیعی همچون زمین‌لرزه، رانش زمین، سیل، توفان، خشکسالی، فعالیت‌های آتشفشانی و بیابان‌زایی در حافظه تاریخی دور و نزدیک آن به ثبت رسیده است. فقدان آمادگی برای واکنش سریع و مؤثر در برابر وقوع چنین پدیده‌های طبیعی موجب شده که همواره دیدگاهی منفی و ناکارآمد در این زمینه وجود داشته باشد، به‌گونه‌ای که اغلب در ادبیات موضوعی از این رخدادها به‌عنوان بلایای طبیعی یاد می‌شود.

بخش عمده دانش مخاطرات به شناخت و واکاوی عوامل برهم‌زننده ایمنی و پایداری محیط و معرفی راهکارهایی بر مبنای علوم و فناوری‌های روز برای پیش‌بینی و کاهش تأثیر آنها بر بهبودی محیط و انسان می‌پردازد [۳]. دانش مخاطرات می‌کوشد انبوهی از فرایندها را قبل، هنگام و پس از رخداد هر مخاطره پیش‌بینی، واکاوی و مدیریت کند تا بتواند تا حد ممکن از آسیب‌های اقتصادی و انسانی پیشگیری کند یا تأثیرات آنها را کاهش دهد. با رخداد هر مخاطره همانند سیل یا زلزله، ناپایداری و پیچیدگی محیطی از ویژگی‌های آشکار فضاهای ویران‌شده به‌شمار می‌رود که در جغرافیای منطقه، زیرساخت‌های شهری، عدم تقارن و توازن نیروها و ناکارآمدی فناوری‌ها و فرایندهای میان‌سازمانی نمایان می‌شود. در چنین شرایطی، دانش مخاطرات در صورتی در زنجیره فعالیت‌های پیش و پس از پیشامدها تعیین‌کننده و کارآمد بود که افزون بر پیشرفت نهاد دانشی آن، با آخرین نوآوری‌ها و فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در علوم فنی و مهندسی پیوند تنگاتنگی داشته باشد. در این زمینه، پرنده بدون سرنشین خودکار از آخرین دستاوردهای صنایع مرتبط با مهندسی هوافضا، هوش مصنوعی، علوم رباتیک و الکترونیک است که می‌تواند موجب توانمندسازی بیشتر انسان در محیط‌های ناشناخته، آلوده، دور از دسترس و فاقد زیرساخت ارتباطی در برآورد بی‌درنگ ویرانی‌های برجای‌مانده از مخاطرات باشد. از این‌رو، اجرای عملیات جست‌وجو و پایش محیط با به‌کارگیری سکوه‌های خودکار، به‌دلیل توانایی گردآوری بی‌درنگ اطلاعات مورد نیاز کارشناسان، راهبردی کارساز برای وارسی و برآورد مخاطراتی همانند سیلاب، سونامی، توفان و زلزله به‌شمار می‌آید [۱۷].

در دهه کنونی، به‌کارگیری پرنده‌های بدون سرنشین (UAS)^۱ به‌عنوان سکوه‌های حامل سنجنده‌های چندمنظوره در زمینه‌های گوناگونی همچون فوتوگرامتری، سنجش از دور، گیتانگاری، جست‌وجو و پیگیری هدف، مدیریت مخاطرات و پایش ویرانی‌های برآمده از زلزله به‌ویکردی نوین و اقتصادی در جهت بالا بردن خودکاری، بهره‌وری و کارایی پروژه‌ها تبدیل شده است [۶،۹]. با توجه

به رویکرد پژوهشی سال‌های گذشته در بخش علوم و فناوری‌های هوایی، روند تکامل پرنده‌های بدون سرنشین از سیستم‌های کنترل‌شونده از راه دور به سمت ناوبری خودکار و یا ترکیبی است. در سیستم‌های ترکیبی، با توجه به اطلاعات دریافتی از ایستگاه کنترل و با نظارت عامل انسانی، هر پرنده قادر به اجرای خودکار برخی اعمال مأموریت نظیر دنبال کردن هدف و جست‌وجوی محیط است [۲۰]. در این زمینه، توسعه الگوریتم‌های جامع، کارآمد و پایدار جهت مسیریابی، کنترل، ناوبری و پردازش اطلاعات سنجنده‌های UAS به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین گام‌ها در زمینه توسعه سیستم‌های خودکار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۸]. با در نظر گرفتن الزامات هر مأموریت پرواز و پیچیدگی فضایی مأموریت‌های UAS خودکار، طراحی و برآورد پارامترهای بهینه مأموریت پرواز، به‌صورت دوبعدی یا سه‌بعدی و با محوریت کارور انسانی برای هدایت و ناوبری در محیط‌های پیچیده خود امری نالایم، پرخطر و حتی ناشدنی است [۱۰]. از این رو، با تعیین پارامترهای پرواز و مدل رقومی منطقه عملیات پیش از آغاز پرواز سکو می‌توان این مسئله را به‌صورت الگوریتم بنیان حل کرد [۱۳]. توسعه الگوریتم‌های سریع و کارا برای بهینه‌سازی و طراحی خودکار مأموریت سکوها پرنده، در زمینه پرنده‌های هوایی و کاربردهای وابسته به آن همانند مدیریت مخاطرات و پایش مناطق زلزله‌زده ضروری است [۴، ۱۱].

پس از رخداد زلزله، اغلب نقشه به‌هنگام و قابل‌اعتمادی از محیط در دسترس نیست، زیرساخت‌های زمینی مجهز نیستند یا ویران شده‌اند و زمان به عاملی حیاتی برای جست‌وجو و اکتشاف مجروحان زیر آوار تبدیل می‌شود. از این رو، مدیریت مخاطرات و پایش محیط‌های زلزله‌زده یکی از بارزترین زمینه‌هایی است که به‌کارگیری سامانه‌های خودکار موجب بهبود کیفیت مأموریت‌های امدادسانی و بازدهی عملیات جست‌وجو می‌شود. منظور از این کاربرد، این نیست که با به‌کارگیری الگوریتم‌های برنامه‌ریزی، یک سیستم بدون سرنشین می‌تواند مأموریت پایش محیط را به‌صورت خودکار به انجام برساند، بلکه بدین معناست که دستیابی به ناوبری خودکار بدون طراحی و به‌کارگیری الگوریتم‌های برنامه‌ریز در کنار دیگر الگوریتم‌های بخش کنترل سکو ناشدنی است [۱۶، ۱۸]. برای نمونه، در یک مأموریت هوایی برای پایش یک ویرانه در بافت شهری، کمینه‌سازی پارامترهایی همچون نواحی پنهان، شمار عکس‌ها، خطاهای هندسی و رادیومتریک تصویر، زمان مأموریت، کارکرد سوخت و بیشینه‌سازی عواملی مانند شمار اهداف ثبت‌شده، بازدهی عملیات و ارتفاع از سطح، از اهداف بهینه‌سازی مأموریت سکوست. در این الگوریتم‌ها، گزینش معیارهایی که باید برای بهینه‌سازی مأموریت انتخاب شود در کنترل کارور یا کارشناس مستقر در ایستگاه کنترل زمینی است. با توجه به ترجیحات کارشناس، محاسبات ممکن است به نتایج مختلفی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های اجرایی مأموریت از نظر سوخت و

انرژی، یافتن کوتاه‌ترین خط سیر میان دو ایستگاه عملیات، گردآوری اطلاعات لازم برای به‌روزرسانی مدل رقومی محیط یا جست‌وجوی هدف یا عارضه ویژه‌ای در محیط بینجامد. قیود چنین مأموریتی عبارت‌اند از تراز کارکرد سوخت و انرژی و چارچوب‌های دینامیکی پرواز سکو با توجه به قابلیت‌های عملکردی هر دستگاه، محدودیت‌های سنجنده شامل درصد همپوشانی تصاویر، میدان دید دوربین^۱ یا زاویه اسکن، میانگین ارتفاع پرواز؛ محدودیت‌های محیط پرواز از جمله حفظ فاصله ایمن از موانع و ارتفاعات توپوگرافی؛ محدودیت‌های هدف شامل قیود قدرت تفکیک زمینی^۲ با توجه به نوع و مشخصات هدف؛ و محدودیت‌های مأموریت مانند مداومت پروازی و شمار نقاط کنترل مورد نیاز برای ساخت مسیر و دقت لازم برای نتایج عملیات.

در فرایند بهینه‌سازی پایش با سکوهاى پرنده، هدف یافتن خطوط سیر بهینه، کنش‌پذیر و قابل پرواز سکو یا گروهی از سکوها با توجه به هندسه فضایی محیط پرواز، پارامترها و قیود مأموریت در یک زمان مناسب است [۸]. الگوریتمی که افزون بر برآورد اهداف مأموریت و وظایف سیستم پیچیدگی محاسباتی و زمانی کمتری داشته باشد، برای تعیین پارامترهای بهینه مأموریت سکو در گام طراحی پرواز مطلوب‌تر خواهد بود [۹]. در پژوهش‌های پیشین، قیودی شامل ارتباطات بی‌سیم، شعاع چرخش سکو، ایمنی سیستم، مؤلفه‌های سرعت، ارتفاع و شعاع شناسایی هدف در مدلسازی مسیریابی لحاظ شده‌اند [۸]. همچنین روش‌هایی از جمله شبکه‌های عصبی [۷]، برنامه‌نویسی پویا^۳ [۱۲]، MILP^۴ [۲۰] و منطق فازی [۲۱] برای حل مسئله از رده NP-hard بهینه‌سازی UAS مطرح شده است. با وجود روش‌های مختلف، الگوریتم‌های فرااکتشافی^۵ به دلیل برتری‌هایی از جمله سهولت در پیاده‌سازی و مدلسازی مسئله، انعطاف‌پذیری زیاد در برابر تغییر پارامترها، پیچیدگی فضایی محیط و ابعاد مسئله، امکان به‌کارگیری قیود اضافی بدون نیاز به مدلسازی مجدد، یافتن پاسخ تقریبی با اجرای اپراتورهای جست‌وجوی سراسری و محلی در مورد مسائل NP-hard، امکان ترکیب و بهبود با کمک دیگر روش‌های محاسباتی و وجود راهکارهای بسیار برای پرهیز از نقاط بهینه محلی به‌صورت فراگیری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱۵].

در پژوهش حاضر، یک الگوریتم فرااکتشافی جدید بر مبنای معادلات گرانی‌سنجی طراحی شده و قابلیت الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله بهینه‌سازی مأموریت پایش زلزله سکوهاى پرنده

-
1. Field of View
 2. Spatial Resolution
 3. Dynamic programming
 4. Mixed-integer Linear Programming
 5. Meta-heuristic Algorithms

سنجیده می‌شود. سپس با به‌کارگیری الگوریتم‌های دیگری شامل الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)^۱، توده‌ذرات (PSO)^۲ و زنبور عسل مصنوعی (ABC)^۳ [۱۴] بهینه‌سازی UAS در محیط شبیه‌سازی شده انجام می‌گیرد. از این‌رو، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده ارزیابی و سنجش الگوریتم‌های فرااکتشافی در حل مسئله مسیریابی سه‌بعدی نیز است. در ادامه، تحلیل عملکرد الگوریتم‌های پیاده‌شده بر مبنای شاخص موفقیت، زمان اجرا، دقت و کیفیت پاسخ‌ها ارائه می‌شود.

روش‌شناسی

در این مسئله بهینه‌سازی مأموریت پرنده‌های بدون سرنشین با فرض مشخص بودن چارچوب زمانی-مکانی، پیکربندی فضایی محیط حرکت، حالت کنونی سکو یا گروهی از سکوها، هدف تعیین گذرگاه‌های بهینه، قابل پرواز و کنش‌پذیر برای حرکت پیوسته سکو است؛ به‌گونه‌ای که در کمترین زمان ممکن، تابع هدف از پیش طراحی‌شده‌ای با در نظر گرفتن قیود دینامیکی حرکت سکو و پارامترهای مؤثر در مأموریت پرواز، بهینه شود و سکو بتواند با حرکت بر روی مسیر برآوردشده به جایگاهی معین در چارچوب زمانی-مکانی مأموریت برسد [۸]. در این پژوهش، این مسئله به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مقید طراحی می‌شود، به‌گونه‌ای که با لحاظ پارامترهای دینامیکی پرواز و با پرهیز از نواحی ممنوع و بیرون از نقشه عملیاتی، مسیر ایمن با کمترین مسافت و انرژی محاسبه شود. بر این اساس، در معادله ۱، یک تابع هزینه جامع برای تمامی قطعات خم بیزیر^۴ تعریف می‌شود که شامل ترم‌های مسافت، ارتفاع و انرژی است و باید همزمان و با لحاظ تمامی قیود، هنگام فرایند بهینه‌سازی مأموریت سکو، در کمترین زمان ممکن کمینه شود [۵]. نویسندگان این مقاله، این مسئله را به‌صورت روابط ۱ تا ۱۶ مدل‌سازی کرده‌اند.

$$\text{Minimize Cost} = \sum_{i=1}^T k_i \text{Cost}_i, \quad k_1, k_T, k_r \in [0, 1] \quad (1)$$

$$\text{Subject to } g_h, g_\varphi, g_\alpha, g_\beta \geq 0, \quad h_{NFZ}, h_{map} = 0,$$

$$\text{Cost}_1 = \sum_{i=1}^{N-1} \min \left\{ \|p(s_{i+1}) - p(s_i)\|_r \right\}, \quad (2)$$

$$\text{Cost}_T = \sum_{i=1}^{N-1} \min \left\{ \|p(s_i) - p(h_i)\|_r \right\}, \quad (3)$$

-
1. Differential Evolution
 2. Particle Swarm Optimization
 3. Artificial Bee Colony Algorithm
 4. Bézier Curve

$$Cost_v = (5/L_v) \sum_{i=1}^{N-1} \{ \|L(d_{i+1}) - L(d_i)\|_v \}, \quad (4)$$

$$g_h = h_{safe} - \min(z_k - H_{terrain}(x_k, y_k)) \geq 0, \quad (5)$$

$$g_\varphi = \max(\varphi_k - \varphi_k^{\max}) \geq 0, \quad (6)$$

$$g_\alpha = \max(s_k - \alpha_k) \geq 0, \quad (7)$$

$$g_\beta = \max(\beta_k - s_k) \geq 0, \quad (8)$$

$$h_{NFZ} = L_{NFZ} = 0, \quad (9)$$

$$h_{map} = L_{outmap} = 0, \quad (10)$$

$$\varphi_k^{\max} = \frac{n_{\max} g}{V} \left[(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 \right]^{\Delta}, \quad (11)$$

$$\alpha_k = -1/53 \times 10^{-10} z_k^2 - 2/69 \times 10^{-5} z_k + 0/42 \quad (12)$$

$$\beta_k = 2/50 \times 10^{-9} z_k^2 - 6/30 \times 10^{-6} z_k - 0/32, \quad (13)$$

$$s_k = \frac{z_{k+1} - z_k}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}}, \quad (14)$$

$$P(s) = \sum_{m=0}^n s^m L_m, \quad (15)$$

$$L_m = \frac{n!}{(n-m)!} \sum_{i=0}^m \frac{(-1)^{i+m} Z(i)}{i!(m-i)!} \quad (16)$$

پارامترهای به کاررفته در معادلات مطرح شده بدین صورت تعریف می شود:

$H_{terrain}$: ارتفاع هر نقطه مسطحاتی براساس DTM	i : شماره نقاط کنترل (گره ۰ بیانگر نقطه ابتدا و گره های ۱ تا $N-1$ نشان دهنده موقعیت های متوالی سکو)
φ_k^{\max} : بیشینه زاویه چرخش در هر گره خم	N : تعداد کل نقاط کنترل خط سیر سکو
n_{\max} : بیشینه اضافه بار پهلوئی	h_{safe} : پارامتر ایمنی برای جلوگیری از برخورد سکو با سطح منطقه
g : ثابت شتاب گرانش	d_i : قطعه مسیر i ام
V : اندازه سرعت حرکت سکو	$l(d_i)$: طول قطعه مسیر i ام
s_k : زاویه شیب سکو	L_0 : مجموع طول قطعات مسیر تا نقطه پیموده شده
α_k : بیشینه شیب بالاروی	L_u : طول مسیر تولید شده بر مبنای خم $p(s)$
β_k : کمینه شیب خزشی	$p(h_i)$: ارتفاع موقعیت i ام در سیستم مختصات محلی
h_{NFZ} : طول مسیر واقع در درون کرانه ممنوع	
L_{outmap} : طول قطعه مسیر واقع در بیرون ناحیه مجاز پرواز	

در رابطه ۱، پارامتر k به‌منظور پاسخگویی به تمایلات مرکز تصمیم‌گیری برای اجرای مأموریت، گزینش اولویت‌های اجرایی و تأمین انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای کنترل یکپارچه فرایندهای بهینه‌سازی تعریف می‌شود. در رابطه ۶، φ_k^{\max} نشان‌دهنده بیشینه زاویه چرخش در هر نقطه مسیر است که مطابق رابطه ۱۱ به فراخور بیشینه اضافه‌بار پهلوئی n_{\max} ، شتاب گرانش g و سرعت پرواز V برآورد می‌شود. مطابق روابط ۷ و ۸، زاویه شیب سکو s_k در نقطه کنترل $p(u_k)$ وابسته به بیشینه شیب بالاروی α_k و کمینه شیب خزشی β_k است. روابط ۱۲ تا ۱۴ نشان‌دهنده شیوه محاسبه s_k ، α_k و β_k بر پایه ارتفاع هر نقطه کنترل اند [۵]. قید h_{NFZ} در رابطه ۹ برای جلوگیری از ورود سکو به ناحیه پرواز ممنوع، مانند نواحی ناشناخته، ساختمان‌های بلند و نواحی پرخطر برای سکو تعریف شده است. در این رابطه L_{NFZ} طول بخشی از مسیر سکو است که در درون کرانه ممنوع واقع شده است. از سوی دیگر، پرواز سکو نیز باید در درون گستره مجاز پرواز انجام گیرد، بدین سبب، قید h_{map} براساس معادله ۱۰ تعیین می‌شود. در این رابطه L_{outmap} طول بخشی از قطعه مسیر است که بیرون ناحیه مجاز پرواز واقع شده باشد.

در الگوریتم مسیریابی، برای دستیابی به مسیر قابل پرواز، کاهش پیچیدگی هندسی مسیر، انعطاف‌پذیری در طراحی مأموریت‌های متفاوت، امکان طراحی دوباره قطعات مسیر از یک نقطه به بعد و کاهش پیچیدگی زمانی-حافظه الگوریتم، از مدل ریاضی خم‌های بی‌زیر بهره‌گیری می‌شود. حالت چندجمله‌ای خم‌های بی‌زیر با نقاط کنترل $\{Z_0, Z_1, \dots, Z_n\}$ مطابق معادلات ۱۵ و ۱۶ است [۸]. فلوچارت الگوریتم طراحی شده به‌منظور بهینه‌سازی مأموریت سکو در شکل ۱ نمایش داده شده است. سکوی پرنده پس از دریافت پارامترهای اولیه به پرواز بر فراز منطقه زلزله‌زده می‌پردازد و از طریق سنجنده‌های سوار بر سکو محیط را پایش می‌کند. از آنجا که اطلاعات جدیدی از عوارض محیط آسیب‌دیده در دسترس نیست، پرنده اطلاعات توپوگرافی زمینی را از طریق تولید برخط یا دریافت مدل رقمی زمین از پایگاه داده در اختیار خواهد داشت. با توجه به معلوم بودن مختصات دوربین نصب‌شده بر روی سکو از طریق GPS، موقعیت‌های هدف با توجه به فرایندهای پردازش تصویر به‌دست می‌آید. این موقعیت‌ها نیز برای تعیین گذرگاه‌های مسیر و تولید خطوط سیر به‌کار گرفته می‌شود. سپس کلیه پارامترهای لازم وارد بخش بهینه‌سازی مأموریت می‌شود. شبیه‌سازی‌های این مقاله بیشتر متمرکز بر بخش بهینه‌سازی مأموریت و پردازش مسیرها در نیمه راست فلوچارت شکل ۱ است.



شکل ۱. فلوچارت طراحی شده الگوریتم بهینه‌سازی مأموریت UAS خودکار

الگوریتم جدید بهینه‌سازی پتانسیل ثقل

در تئوری محاسبات تکاملی الگوریتم‌های بهینه‌سازی گوناگونی با عملگرهای تصادفی و با الهام‌گیری از رفتار و ویژگی‌های گوه‌ری سیستم‌های طبیعی و بیولوژیکی مانند تکامل، حافظه، استحکام، خودسازماندهی، برهم‌کنش، رقابت، یادگیری، انعطاف‌پذیری و دگرسانی توسعه‌یافته‌اند [۶]. در این زمینه، الگوریتم‌هایی بر مبنای فیزیک پدیده‌ها توسعه داده شده‌اند که اغلب بر مبنای سیر تکامل و خودسازماندهی اجزای تشکیل‌دهنده آن شکل گرفته و از طرفی این سیستم خود در حضور قوانین فیزیکی اولیه تکامل یافته است. از این‌رو، الهام‌گیری از فیزیک پدیده‌های زمین‌شناختی نظیر اصول بنیادین ژئودزی فیزیکی می‌تواند به الگوریتم‌هایی با نتایج برتر در حل مسائل غیرخطی بهینه‌سازی مهندسی منجر شود [۸، ۲۰]. الگوریتم‌های تکامل‌یافته، توده ذرات و زنبور عسل مصنوعی از پرکاربردترین روش‌های محاسبات تکاملی است. در الگوریتم توده ذرات، با افزایش تکرارها، جمعیتی تصادفی از ذرات با بردارهای سرعت و موقعیت اولیه متفاوت به سمت موقعیت ذراتی با تابع هزینه کمتر حرکت می‌کنند. بدین منظور، سرعت و موقعیت ذرات با توجه به بهترین سرعت و موقعیت تجربه‌شده به وسیله آن ذره و بهترین موقعیت به دست آمده توسط ذرات همسایه به روز می‌شود [۵]. در روش تکامل اختلافی، فرایند جست‌وجوی تصادفی، جمعیت اولیه‌ای از پاسخ‌های مسئله را از طریق تکرار متوالی عملگرهای جهش، تقاطع و انتخاب به سمت پاسخ‌های با بهترین برازندگی هدایت می‌کند [۸]. در روش استاندارد زنبور عسل مصنوعی ارائه‌شده توسط درویش کارابوا [۱۴]، جمعیت پاسخ‌های اولیه دربرگیرنده سه گونه زنبور

موسوم به زنبورهای کارگر، جست‌وجوگر و دیدبان است که به‌منظور یافتن پاسخ‌های برتر و بازدید بیشتر گلزارهای مطلوب در سه فاز با یکدیگر همکاری می‌کنند.

الگوریتم بهینه‌سازی پتانسیل ثقل (GPO)^۱ یک الگوریتم فیزیکی مبنای تکاملی است که با الهام از محاسبات ریاضی تعیین ژئوئید مبنا در معادلات ژئودزی فیزیکی برای نخستین بار در این پژوهش طراحی و پیشنهاد می‌شود. مطابق دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم با یک جمعیت اولیه از پاسخ‌های کاندید آغاز می‌شود. در الگوریتم حاضر، جمعیت پاسخ‌های اولیه شامل شتاب‌های ثقل اندازه‌گیری‌شده در سطح زمین در فرایند گرانی‌سنجی است. شتاب ثقل در نقاط مختلف سطح زمین تابع موقعیت اندازه‌گیری، توزیع جرم درونی زمین، تغییرات زمانی جرم درون زمین و دیگر متغیرهاست [۱،۲]. از این رو، هر اندازه‌گیری می‌تواند n متغیر داشته باشد.

$$W_i = f(U_1^i, U_2^i, \dots, U_{N_{var}}^i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (17)$$

باید توجه شود که روند محاسبات شتاب ثقل و اعمال تصحیحات مختلف نظیر آنامولی بوگه و هوای آزاد و انتقال مقادیر بر روی ژئوئید و بیضوی مرجع یا هر سطح دیگری تفاوتی در ساختار و مراحل الگوریتم ایجاد نمی‌کند. همچنین در نظر گرفتن معادلات بنیادین ثقل سنجی در ژئودزی فیزیکی بدین معنا نیست که داده‌های ورودی به مقادیر دیگری نظیر N یا T تبدیل شوند. چنین تبدیلاتی صرفاً موجب افزایش بار محاسباتی الگوریتم، افزونی خطای برآمده از پارامترهای بیش‌ازحد، افزایش اعشار و کاهش سرعت محاسبات می‌شود و در فرایند یافتن کمینه تابع هدف تغییری ایجاد نمی‌کنند. از این رو می‌توان ورودی الگوریتم را هم‌ارز با اعداد ژئو پتانسیل و یا پتانسیل سطوح مختلف از قبیل پتانسیل بیضوی مرجع در نظر گرفت.

نکته درخور توجه با نظر به آنومالی پتانسیل T ، وجود سطوح فرضی مختلف و حرکت آنها در شرایط محاسباتی متفاوت در فاصله میان ژئوئید و بیضوی مرجع است. در این مقاله، این فرضیات در نظر گرفته شده است که سطوح زیرین ژئوئید در بهترین حالت محاسبات تقریب ژئوئید، برآزش بهتری از سطح ژئوئید منطبق بر سطح آب‌های آزاد ارائه می‌دهند [۱،۲]. همچنین سطوح به‌سوی سطوح بهتر با پتانسیل بیشتر (هزینه کمتر) حرکت می‌کنند و از سطوح با پتانسیل کمتر (هزینه بیشتر) دور می‌شوند. از آنجا که حرکت سطوح تنها در راستای یک خط شاغول در نظر گرفته می‌شود، موقعیت هر نقطه در فضای جست‌وجو هم‌ارز یک سطح است؛ بنابراین جابه‌جایی نقاط در فضای n -بعدی مسئله به سمت نقطه بهینگی هم‌ارز خزش و حرکت سطوح هم‌پتانسیل به سمت ژئوئید است.

1. Gravitational Potential Optimization algorithm

پاسخ‌های اولیه در سراسر فضای جست‌وجوی مسئله پراکنده شده و پتانسیل (برازندگی) متنظر با هر پاسخ کاندید براساس تابع هدف محاسبه می‌شود. در هر تکرار، متغیر با بهترین پاسخ (کمترین هزینه) به‌عنوان شتاب ژنویید و بدترین پاسخ (بیشترین هزینه) به‌عنوان شتاب نرمال بیضوی مرجع انتخاب شده و دیگر اعضای جمعیت به‌عنوان شتاب دیگر سطوح هم‌پتانسیل فرضی دیگر مانند تلوروئید و شبه‌ژنویید انتخاب می‌شوند. با توجه به انتگرال استوکس و امکان محاسبه N براساس مشاهدات گرانی‌سنجی [۱،۲]، در این مقاله، هزینه هر عضو به‌عنوان پتانسیل یک سطح مرجع در نظر گرفته می‌شود.

در هنگام تکرارهای الگوریتم، پتانسیل هر سطح تحت تأثیر پتانسیل بهترین سطح به پتانسیل ژنویید میل می‌کند. این فرایند در طی دو مرحله شامل فاز ژنویید و فاز میان‌سطحی تکمیل می‌شود. در مرحله فاز ژنویید، پس از پراکنده شدن نقاط در فضای جست‌وجو، نقاط به‌سمت نقطه ژنویید به‌عنوان بهترین نقطه از نظر برازندگی حرکت می‌کنند. در این فرایند باید پتانسیل متنظر با هر نقطه تا حد پتانسیل ژنویید تغییر کند؛ به‌عبارت دیگر، ژنویید سعی می‌کند میانگین پتانسیل نقاط را تا حد خود افزایش دهد. فرض کنید در هر تکرار m پارامتر طراحی، n سطح هم‌پتانسیل وجود داشته و $meanU_{j,i}$ میانگین نتایج نقاط در اندازه‌گیری j ام باشد. اختلاف میانگین نتایج هر اندازه‌گیری ثقل و پتانسیل ژنویید با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Delta T_{j,i} = r_i \times \left(U_{best,j,i} - (k_g)^{-1} (meanU_{j,i}) \right), \quad (18)$$

در این رابطه، $U_{best,j,i}$ نتیجه بهترین پاسخ (ژنویید) در اندازه‌گیری (تکرار) j ام، r_i یک عدد تصادفی در بازه (۰،۱) و k_g نشان‌دهنده ضریب تأثیر ژنویید و در بازه (۱،۲) است. سپس، پاسخ جاری بر مبنای معادله بعد به‌روزرسانی می‌شود.

$$U_{new,j,i} = \alpha U_{old,j,i} + \Delta T_{j,i} \quad (19)$$

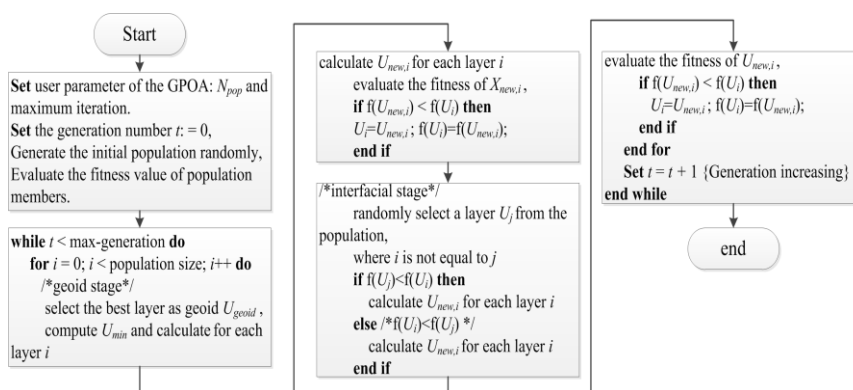
که در این رابطه $U_{new,j,i}$ موقعیت به‌روز شده $U_{old,j,i}$ و α یک عدد در بازه (۱،۲) برای کنترل تأثیر متغیر پیشین است.

در صورتی که $U_{new,j,i}$ تابع هدف کمتری داشته باشد، ذخیره و وارد فاز میان‌سطحی می‌شود. در فاز میان‌سطحی، پتانسیل پاسخ‌ها براساس تعاملات تصادفی میان‌گروهی افزایش می‌یابد. هر سطح به سطح برتر نزدیک می‌شود و از سطح با برازندگی بیشتر فاصله می‌گیرد. در صورتی که $U_{new,j,i}$ تابع هزینه کمتری داشته باشد ذخیره و جهت تکرار چرخه محاسبات وارد فاز ژنویید می‌شود.

$$U_{new,i} = U_{old,i} + r_i (U_i - U_j), \text{ if } f(U_i) < f(U_j) \quad (20)$$

$$U_{new,i} = U_{old,i} + r_i (U_j - U_i), \text{ if } f(U_j) < f(U_i) \quad (21)$$

دو فاز الگوریتم به صورت پیاپی تکرار می‌شود و در پایان الگوریتم، تنها بهترین پاسخ در فضای جست‌وجو باقی می‌ماند و پتانسیل همه سطوح یکسان است و از دیدگاه ریاضی همه سطوح اولیه بر سطح ژئوئید منطبق می‌شوند. این شرایط یا دقت نتایج می‌تواند به‌عنوان قید پایان الگوریتم لحاظ شود. از مزایای این الگوریتم می‌توان به سادگی محاسبات، اپراتورهای خطی و ساده، سرعت زیاد همگرایی، و شمار اندک پارامترهای اولیه در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها اشاره کرد. برای اطلاع خوانندگان علاقه‌مند، جزئیات شبه‌کد-فلوچارت ترکیبی الگوریتم جدید در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. شبه‌کد-فلوچارت الگوریتم پیشنهادی آنومالی پتانسیل ثقل GPO

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج برآمده از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله مطرح ارائه شده است. پارامترهای الگوریتم‌ها به صورت استاندارد تنظیم شده و برای پیاده‌سازی‌ها از نرم‌افزار متلب و رایانه‌ای با توان پردازش ۱/۷ گیگاهرتز بهره‌گیری شده است. کلیه پیاده‌سازی‌ها نیز در شرایط برابر و رایانه‌ای یکسان اجرا شده است. به منظور تحلیل زمان اجرا، دقت و کیفیت پاسخ‌ها تعداد تکرار هر الگوریتم برای همگرایی به پاسخ‌های قابل اعتماد در سطح ۵۰۰ حلقه تنظیم شده است. انتخاب پارامترهای الگوریتم‌ها به کارآمدی و مهارت کافی نیاز داشته و امکان تفاوت بهترین مقادیر برای پارامترها در هر مسئله وجود دارد. با توجه به مراجع [۱۴، ۸، ۹]، مناسب‌ترین پارامترهای اولیه برای الگوریتم‌ها انتخاب شده‌اند. برای کاهش وابستگی الگوریتم‌ها به نحوه انتخاب پارامترهای اولیه، میانگین پیاده‌سازی‌های مستقل محاسبه شده است. از این رو، جمعیت

اولیه برای هر الگوریتم ۱۰۰ است و در الگوریتم DE نرخ تقاطع ۰/۵ و فاکتور وزن ۰/۹۵، در PSO ثابت اولیه ۰/۳ و ثابت اجتماعی و ادراکی ۱، در ABC ۲۵ زنبور کارگر، حد ۵۰ و T_{max} برابر با ۲۰۰ انتخاب شده است.

برای شبیه‌سازی مأموریت پایش زلزله فرض می‌شود که در منطقه‌ای به مساحت 100×100 کیلومتر مربع، ۲۰ مجروح نیازمند امدادسانی هستند و از یک سکو با سرعت مجاز ۶۰ کیلومتر بر ساعت برای پایش منطقه استفاده شود. از این رو، پارامترهای شبیه‌سازی مأموریت پایش زلزله نیز بدین صورت تنظیم شده است: تعداد اولیه ۲۰ مجروح در قید (۳)، ابعاد منطقه پایش 100×100 کیلومتر مربع، سرعت مجاز V برای پرنده برابر با ۶۰ کیلومتر در ساعت، n_{max} برابر ۶، تعداد ۶۰ نقطه کنترل برای محاسبه خم‌های بزیر، شتاب گرانش g برابر 9.81 m/s^2 ، پارامترهای وزن دهی k_1 ، k_2 و k_3 برابر با ۰/۳۳، n_{safe} برابر ۶۰ متر. مقادیر k_1 ، k_2 و k_3 برابر نشان‌دهنده این است که تأثیر توابع هزینه در نتایج یکسان است. از آنجا که عملکرد الگوریتم‌ها باید در همه محیط‌ها و با هر مقدار اولیه‌ای باثبات^۱ باشد، تغییر این 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 آنجا که میانگین‌گیری نیز انجام گرفته است، مقدار آنها تأثیری بر سرعت نسبی و دقت نسبی روش‌های آزمایش شده نخواهد داشت. در انتخاب داده‌های اولیه مأموریت سعی بر آن بوده که شبیه‌سازی تا حد ممکن به واقعیت نزدیک باشد. در جدول ۱، نتایج برآمده از بررسی‌های آماری بهترین، میانگین، بدترین مقادیر و انحراف از معیار تابع هزینه گذرگاه‌ها پس از میانگین‌گیری روی ۵۰ شبیه‌سازی مستقل گزارش شده است.

جدول ۱. مقایسه آماری عملکرد الگوریتم‌ها از دید کیفیت و دقت نتایج مأموریت با در نظر گرفتن همه قیود

الگوریتم	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف از معیار
DE	۷۵/۱۷۵۲۶۸	۷۸/۴۲۹۱۵۵	۸۸/۵۴۲۱۰۲	۸/۱۹۶۷۳۹
ABC	۷۶/۸۵۲۹۲۳	۸۱/۲۵۱۲۷۳	۹۴/۰۰۸۴۴۷	۸/۷۵۱۳۰۲
PSO	۷۹/۲۴۸۴۷۹	۸۲/۵۶۸۳۷۷	۹۳/۸۴۷۱۶۴	۹/۱۵۸۱۷۳
GPO	۷۲/۷۳۶۰۰۷	۷۶/۳۰۴۳۰۲	۸۶/۱۱۴۷۹۳	۷/۷۸۲۱۰۶

با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که نتایج الگوریتم GPO دارای انحراف از معیار کمتری در مقایسه با دیگر روش‌هاست. بر مبنای دقت، روش‌های تکامل تفاضلی، زنبور مصنوعی و

توده‌ذرات در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. این افزایش دقت به‌دلیل بیشتر بودن ویژگی متمرکزسازی^۱ الگوریتم جدید نسبت به الگوریتم‌های پیشین و کمتر بودن پارامترهای اولیه است. در صورتی که توزیع نقاط کاندید در فضای جست‌وجو گسترده‌تر باشد، قابلیت متنوع‌سازی^۲ الگوریتم بیشتر از متمرکزسازی آن خواهد بود. در این آزمایش‌ها، GPO در فرایند اکتشاف محیط، فضای مسئله را با تکیه بر تمرکز بیشتری جست‌وجو می‌کند. از دیدگاه کیفیت پاسخ‌ها، با توجه به میانگین مقادیر، دارای بدترین و انحراف از معیار پاسخ‌ها، الگوریتم‌های ABC، DE و PSO دارای کیفیت کمتری نسبت به الگوریتم پیشنهادی‌اند که این به‌معنای مطلوبیت بیشتر گذرگاه‌های محاسبه‌شده به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی پتانسیل ثقل است. نتایج موجود در جدول ۱ نشان‌دهنده هزینه کمینه مأموریت برای هر الگوریتم است. در صورتی که تنها طول مسیر در نظر گرفته می‌شد، این نتایج نشان‌دهنده طول کوتاه‌ترین مسیر ممکن میان نقاط آغاز و پایان پرواز سکو می‌بود، اما در این پژوهش قیود و اهداف بیشتری لحاظ شده است. از این‌رو، خطوط متصل‌کننده نقاط کنترل محاسبه‌شده توسط الگوریتم، لزوماً بیانگر کوتاه‌ترین مسیرهای ممکن نیستند، بلکه مبین مسیرهای بهینه با توجه به ملزومات و محدودیت‌های مأموریت‌اند. برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از منظر زمان اجرای CPU، زمان اجرای متناظر با هر الگوریتم در جدول ۲ ارائه شده است. بر مبنای نتایج جدول ۲، در ۵۰ تکرار زمان اجرای تکامل تفاضلی کمتر از GPO است، اما با افزایش حداکثر تولید هر الگوریتم به ۱۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰، الگوریتم پیشنهادی دارای سرعت محاسبات بیشتر و زمان اجرای کمتری است. این امر نشان می‌دهد که افزایش مراحل محاسبات الگوریتم، توان پردازش الگوریتم را در برابر دیگر روش‌ها کمتر کاهش می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه زمان اجرای CPU الگوریتم‌ها برحسب ثانیه با تغییر بیشینه تکرارهای هر الگوریتم

الگوریتم/تکرارها	۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰
DE	۰۴/۲۵۹۸۵۶	۰۷/۷۳۶۱۱۵	۰۹/۹۵۲۴۹۶	۱۱/۴۵۸۷۷۱	۱۸/۵۴۲۲۷۶
ABC	۰۶/۸۹۶۷۳۳	۰۹/۱۸۶۱۰۸	۱۱/۳۵۸۷۷۵	۱۳/۱۱۲۱۱۷	۲۰/۴۴۵۷۷۹
PSO	۰۷/۱۱۲۰۸۸	۱۰/۶۵۵۴۴۶	۱۲/۷۸۹۸۳۱	۱۳/۸۸۹۵۴۵	۲۴/۷۱۱۱۵۶
GPO	۰۵/۴۱۲۵۳۳	۰۶/۵۰۲۵۵۶	۰۹/۰۰۱۲۲۸	۱۰/۴۴۵۶۲۰	۱۷/۵۵۵۲۴۷

یکی از معیارهای رایج برای ارزیابی الگوریتم‌ها مقایسه دفعات اجراهای موفق الگوریتم در مسئله و با پارامترهای یکسان نسبت به قید کیفی است. در مسئله بهینه‌سازی مأموریت سکوها پرنده این

1. Exploitation
2. Exploration

قید می‌تواند با توجه به دقت مورد نیاز نتایج و توسط کارشناس پرواز تعیین شود. به منظور ارزیابی قابلیت روش ارائه شده از دید نرخ اجراهای موفق در شبیه‌سازی‌های مستقل، شاخص موفقیت الگوریتم در جست‌وجو و اکتشاف نقاط بهینه مسئله به صورت رابطه ۲۲ تعریف می‌شود:

$$S_r = 100 \times [exe_{\text{successful}} / exe_{\text{total}}] \quad (22)$$

در این رابطه $exe_{\text{successful}}$ نشان‌دهنده شمار اجراهای موفق یک روش و exe_{total} بیانگر مجموع کل اجراها در یک شبیه‌سازی است. قید پذیرش یک اجرا به عنوان یک اجرای موفق نیز بر اساس رابطه ۲۳ تعریف می‌شود:

$$\sum_{d=1}^{Dim} (U_i^{gb} - U_i^B)^2 \leq (L_{\max} - L_{\min}) \times 10^{-3} \quad (23)$$

در معادله ۲۳، U_i^{gb} بهترین پاسخ سراسری یافت‌شده در فضای جست‌وجو؛ U_i^B پاسخ بهینه؛ Dim بعد مسئله؛ و L_{\min} و L_{\max} نیز بیانگر کران متغیرهای مسئله هستند. براساس این رابطه، هرگاه اختلاف پاسخ یافت‌شده با بهترین پاسخ مسئله (اکسترمم) کمتر از یک‌هزارم باشد، اجرای جاری به عنوان اجرای موفق ثبت می‌شود. نتایج به دست آمده مربوط به پتانسیل الگوریتم‌های مختلف پس از ۱۰۰ بار تکرار شبیه‌سازی‌ها برای هر روش در جدول ۳ گزارش شده است. در سطر آخر جدول ۳، مجموع زمان‌های اجرای هر الگوریتم (CPU) در آزمایش‌های پیاپی گزارش شده است. بر مبنای این نتایج، الگوریتم پیشنهادی دارای بیشترین نرخ موفقیت و کمترین زمان محاسباتی نیز است.

جدول ۳. عملکرد الگوریتم‌ها بر مبنای نرخ موفقیت

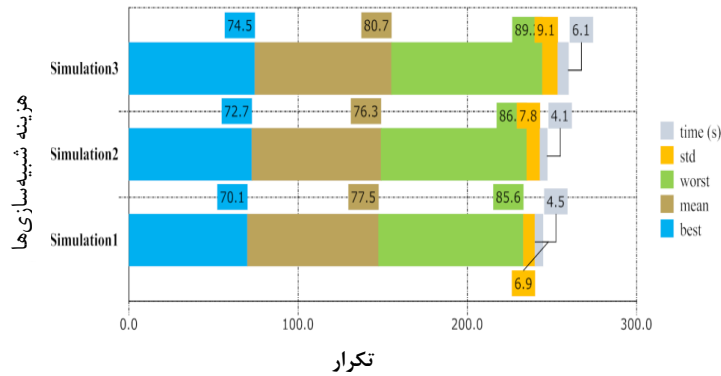
الگوریتم	DE	ABC	PSO	GPO
S_r	۳۵	۲۲	۱۸	۴۸
CPU(s)	۵۲۱/۱۶۲۵۶۷	۶۱۹/۷۲۰۱۷۷	۷۰۹/۱۳۴۳۶۸	۴۸۷/۱۳۱۷۶۶

در جدول ۴، نتایج پیاده‌سازی‌ها در دو آزمایش مختلف با لحاظ تعدادی از قیود ارائه شده است. بر این اساس، با لحاظ قیود ارتفاعی، مکانی و دینامیکی در شبیه‌سازی مأموریت، الگوریتم پیشنهادی از دید بهترین (کمترین)، میانگین و بدترین مقادیر هزینه و انحراف معیار، دارای برتری نسبت به دیگر روش‌هاست (شکل ۳). در ستون آخر، رتبه هر الگوریتم براساس برآیند زمان اجرا و دقت متناظر ارائه شده که رتبه نخست از آن الگوریتم GPO بوده است. با توجه به نتایج، در نظر گرفتن قیود صرفاً دینامیکی شامل قیود ۶، ۷ و ۸ موجب افزایش هزینه و بار محاسباتی الگوریتم‌ها می‌شود. با بررسی نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که برآیند دقت و کیفیت نتایج مسئله ۱ به ترتیب بهتر از

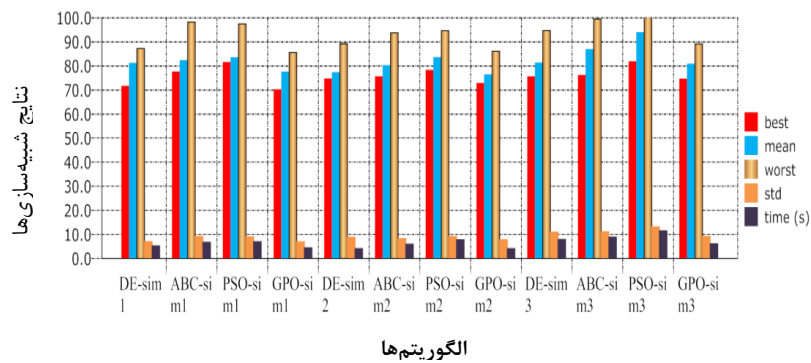
نتایج مربوط به مسئله‌های ۲ و ۳ است. این امر به علت نوع، دقت، تعداد متغیرهای معادلات دینامیکی و همچنین نحوه محاسبه آنهاست. با توجه به معادلات ۶، ۷ و ۸ می‌توان مشاهده کرد که دقت محاسبه این قیود به دقت محاسبه متغیرهای φ_k^{\max} ، α_k و β_k وابسته است. براساس رابطه ۱۱، دقت محاسبه φ_k^{\max} وابسته به دقت بیشینه اضافه بار پهلویی n_{\max} ، شتاب گرانش g ، سرعت پرواز V و خطای مختصات مسطحاتی نقاط است. همچنین براساس روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴، دقت محاسبه s_k ، α_k و β_k وابسته به دقت مسطحاتی و ارتفاعی هر نقطه کنترل است. در نتیجه بار و خطای محاسباتی معادلات ۶، ۷ و ۸ بیشتر از معادلات ۵، ۹ و ۱۰ خواهد بود. از این رو، پاسخ مسائلی که با در نظر گرفتن قیود دینامیکی حل شده باشند، با دقت و کیفیت کمتری از مسائل با قیود مکانی و ارتفاعی به دست می‌آیند. براساس نتایج جدول ۴، برتری کارکرد الگوریتم جدید نسبت به دیگر روش‌ها در هر سه مسئله آشکار است.

جدول ۴. مقایسه آماری عملکرد الگوریتم‌های تکاملی از دید کیفیت و دقت نتایج مأموریت با در نظر گرفتن قیود مختلف

مسئله	حالت‌بندی	شماره و نوع قیود	الگوریتم	بهترین زمان	بدترین زمان	تکرار از معیار	زمان (ثانیه)	رتبه
۱	قیود ارتفاعی و مکانی	۱۰، ۹	DE	۷۱/۵۹۲۲۴	۸۱/۱۲۴۵۳۰	۸۷/۱۷۷۲۸۲	۰۷/۰۰۴۹۵۲	۲
			ABC	۷۷/۵۲۵۴۶	۸۲/۲۲۱۴۶۳	۹۸/۲۳۴۴۵۶	۰۹/۱۴۷۲۲۸	۳
			PSO	۸۱/۴۴۱۲۴۷	۸۳/۴۱۴۶۶۸	۹۷/۴۴۵۷۱۱	۰۸/۹۶۹۹۲۱	۴
			GPO	۷۰/۱۱۴۵۵۶	۷۷/۴۶۹۹۶۳	۸۵/۵۶۸۹۹۶	۰۶/۹۲۳۴۶۳	۱
۲	قیود ارتفاعی و مکانی و یک قید دینامیکی	۹، ۸، ۶، ۵، ۱۰	DE	۷۴/۵۴۷۸۱۳	۷۷/۱۷۷۵۴۸	۸۹/۲۴۷۶۲۴	۰۸/۷۸۱۴۱۴	۲
			ABC	۷۵/۴۷۲۲۰۸	۸۰/۱۲۲۴۳۶	۹۳/۷۴۲۲۱۷	۰۸/۲۳۵۷۹۴	۳
			PSO	۷۸/۱۴۷۲۲۸	۸۳/۴۹۹۶۵۰	۹۴/۵۷۹۸۰۰	۰۹/۱۴۷۰۰۶	۴
			GPO	۷۲/۷۳۶۰۰۷	۷۶/۳۰۴۳۰۲	۸۶/۱۱۴۷۹۳	۰۷/۷۸۲۱۰۶	۱
۳	صرفاً قیود دینامیکی	۸، ۷، ۶	DE	۷۵/۴۷۶۲۸۹	۸۱/۱۷۵۹۹۴	۹۴/۷۰۵۵۰۰	۱۰/۹۹۸۷۵۰	۲
			ABC	۷۶/۱۱۲۷۴۰	۸۶/۷۷۷۰۰۰	۹۹/۴۱۰۷۴۶	۱۱/۱۴۰۰۳۰	۳
			PSO	۸۱/۷۴۲۰۰۷	۹۳/۸۰۱۲۳۰	۱۰۰/۹۹۸۵۴	۱۳/۰۸۸۹۵۰	۴
			GPO	۷۴/۵۰۰۱۴۰	۸۰/۷۳۱۹۷۶	۸۹/۱۹۷۳۰۴	۰۹/۱۴۲۲۷۵	۱



(الف) مقایسه عملکرد الگوریتم GPO در مجموع شبیه‌سازی‌ها



(ب) مقایسه برآیند عملکرد الگوریتم‌های مختلف در مجموع شبیه‌سازی‌ها

شکل ۳. مقایسه نتایج الگوریتم GPO با سایر روش‌ها در شبیه‌سازی‌های سه‌گانه ارائه شده در جدول ۴

نتیجه‌گیری

پس از وقوع مخاطرات طبیعی، اجرای مأموریت در کمترین زمان ممکن، عاملی حیاتی در مدیریت مخاطرات، رسیدگی به‌هنگام به مصدومان و برآورد اولیه خسارات محسوب می‌شود. مسئله طراحی مسیرهای بهینه، علاوه بر اینکه یکی از زیرساخت‌های اصلی در ناوبری خودکار سکوهاست، در مأموریت‌های جست‌وجو و پایش مناطق زلزله‌زده و کیفیت‌بخشی مدیریت مخاطرات حائز اهمیت

ویژه‌ای است. در این پژوهش، به طراحی و ارزیابی یک الگوریتم فرااکتشافی جدید بر مبنای مفاهیم ژئودزی فیزیکی پرداخته شد. سپس، عملکرد الگوریتم طراحی‌شده به‌منظور حل کارای مسئله بهینه‌سازی مأموریت سکوه‌های پرنده در مدیریت مخاطرات و پایش ویرانی‌های ناشی از زلزله سنجیده شد. در ابتدا، این مسئله به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مقید متشکل از سه ترم هزینه و قیود مختلف دینامیکی و محیطی مدلسازی شد. در این مقاله، شرایط و محدودیت‌های مأموریت در ابعاد مکانی، ارتفاعی و دینامیکی در شبیه‌سازی‌ها مدلسازی شد.

با توجه به پیاده‌سازی‌ها و تحلیل‌های مقایسه‌ای، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر کارایی روش مطرح‌شده از منظر زمان اجرا و نرخ موفقیت نسبت به دیگر روش‌هاست. الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن همه قیود ممکن، دارای سرعت محاسبات بیشتر و زمان اجرای کمتری نسبت به الگوریتم‌های تکامل تفاضلی، توده ذرات و زنبور مصنوعی بوده است. همچنین کیفیت راه‌حل‌ها و انحراف از معیار نتایج الگوریتم جدید بهتر از دیگر روش‌ها بوده است. این افزایش دقت به‌دلیل بیشتر بودن توان متمرکزسازی الگوریتم جدید نسبت به الگوریتم‌های پیشین و وابستگی کمتر به پارامترهای اولیه است. افزون بر این، تکرار شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که افزایش مراحل محاسبات الگوریتم و تعداد تکرارهای بیشتر، توان پردازش الگوریتم جدید را به میزان کمتری در مقایسه با دیگر روش‌ها کاهش می‌دهد. بررسی کیفیت و دقت نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که خطای موجود در پارامترهای دینامیکی تأثیر بسزایی در دقت و کیفیت حل مسئله توسط روش‌های مختلف داشته است؛ اما با وجود این نیز تحلیل نتایج شبیه‌سازی مبین اکتساب نتایج برتر با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی پتانسیل ثقل برای حل این مسئله در حالت‌های مختلف است. با نگاهی به عملکرد و ساختار الگوریتم می‌توان به مزایای روش جدید از قبیل سادگی محاسبات، دقت بیشتر، سرعت بیشتر محاسبات، زمان اجرای کمتر و شمار اندک پارامترهای اولیه در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها پی برد. در نتیجه این الگوریتم را می‌توان به‌عنوان روشی سریع و کارا برای بهینه‌سازی مأموریت پایش مخاطرات و طراحی خطوط سیر سکوه‌های پرنده معرفی کرد و به کار گرفت.

منابع

- [۱]. آزموده اردلان، ع؛ صفری، ع (۱۳۸۸). ژئودزی و گرانی، انتشارات دانشگاه تهران: ۵۶.
- [۲]. صفری، ع (۱۳۹۱). ژئودزی فیزیکی، انتشارات دانشگاه تهران: ۹۴.
- [۳]. مقیمی، الف (۱۳۹۳). دانش مخاطرات، انتشارات دانشگاه تهران: ۷۹.
- [4]. Baiocchi, V., Dominici, D., Milone, M. V., & Mormile, M. (2013). Development of a Software to Plan UAVs Stereoscopic Flight: An Application on Post-Earthquake Scenario in L'Aquila City. In *Computational Science and Its Apps-ICCSA 2013*. Springer Berlin Heidelberg. (pp. 150-165).
- [5]. Besada-Portas, E., de la Torre, L., de la Cruz, J. M., and de Andres-Toro, B. (2010). "Evolutionary trajectory planner for multiple UAVs in realistic scenarios." *IEEE Transactions on Robotics*. Vol.26, No.4, PP.619-634.
- [6]. Doherty, P. and Rudol, P. (2007). "A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization." in *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence (PP.1-13)*, Springer Berlin Heidelberg.
- [7]. Duan, H. and Huang, L. (2014). "Imperialist competitive algorithm optimized artificial neural networks for UCAV global path planning." *Neurocomputing*. Vol.125, PP.166-171.
- [8]. Duan, H. and Li, P. (2014). "Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles." Springer. Berlin, Heidelberg.
- [9]. Ergezer, H. and Leblebicioğlu, K. (2013). "Path planning for UAVs for maximum information collection using evolutionary computation". *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* Vol 49, No.1, PP.502-520.
- [10]. Goerzen, C., Kong, Z. and Mettler, B. (2010). "A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance." *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. Vol.57, No.1-4, PP.65-100.
- [11]. Goodrich, M., Morse, B., Gerhardt, D., Cooper, J., Quigley, M., Adams, J. and Humphrey, C. (2008). "Supporting wilderness search and rescue using a camera-equipped mini UAV" *J. Field Robot.* Vol. 25, No.1-2, PP.89-110.
- [12]. Hargraves, C. R. and Paris, S. W. (1987). "Direct trajectory optimization using nonlinear programming and collocation." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Vol.10, No.4, PP.338-342.
- [13]. Kapucu, N., Arslan, T., Demiroz, F. (2010). "Collaborative emergency management and national emergency management network." *Disaster Prevention and Management*. Vol.19, No.4, PP.452-468.
- [14]. Karaboga, D., and Basturk, B. (2008). "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm." *Applied soft computing*. Vol.8, No.1, PP.687-697.
- [15]. Pehlivanoglu, Y. V. (2012). "A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV." *Aerospace Science and Technology*. Vol.16, No.1, PP.47-55.
- [16]. Tisdale, J., Kim, Z. and Hedrick, J. K. (2009). "Autonomous UAV path planning and estimation." *Robotics & Automation Magazine, IEEE*. Vol.16, No.2, PP.35-42.

-
- [17]. Tomic, T., Schmid, K., Lutz, P., Domel, A., Kassecker, M., Mair, E. and Burschka, D. (2012). "Toward a fully autonomous uav: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue." *Robotics & Automation Magazine*, IEEE. Vol.19, No.3, PP.46-56.
- [18]. Zengin, U. and Dogan, A. (2007). "Real-time target tracking for autonomous UAVs in adversarial environments: a gradient search algorithm." *IEEE Transactions on Robotics*. Vol.23, No.2, PP.294-307.
- [20]. Zhan, Z. H., Zhang, J., Li, Y., Liu, O., Kwok, S. K., Ip, W. H., & Kaynak, O. (2010). "An efficient ant colony system based on receding horizon control for the aircraft arrival sequencing and scheduling problem." *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions on, Vol.11, No.2, PP.399-412.
- [20]. Zhang, B., Liu, W., Mao, Z., Liu, J. and Shen, L. (2014). "Cooperative and geometric learning algorithm (CGLA) for path planning of UAVs with limited information." *Automatica*. Vol.50, No.3, PP.809-820.
- [21]. Zhuoning, D., Rulin, Z., Zongji, C., and Rui, Z. (2010). "Study on UAV path planning approach based on fuzzy virtual force." *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol 23, No.3, PP. 341-350.