

## توسعه یک الگوریتم طرح‌ریزی مسیر جستجوی مقید در یک محیط همراه با موانع مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان

علی معتمدی<sup>۱</sup>، مهدی سبزه‌پرور<sup>۲\*</sup>، مهدی مرتضوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا - دانشکده مهندسی هوافضا- دانشگاه صنعتی امیرکبیر [a\\_motamedi@aut.ac.ir](mailto:a_motamedi@aut.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی هوافضا- دانشگاه صنعتی امیرکبیر [sabzeh@aut.ac.ir](mailto:sabzeh@aut.ac.ir)

۴- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان [ma.mortazavi@eng.ui.ac.ir](mailto:ma.mortazavi@eng.ui.ac.ir)

### چکیده

در مسئله جستجو و نجات پس از بلایای طبیعی همانند سیل و زلزله، شناسایی مصدومان و مجروحان احتمالی در کمترین زمان ممکن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین بال ثابت به دلیل مداومت پروازی بالا در جستجوی مناطق وسیع بسیار مورد توجه می‌باشد. در این مقاله یک روش طرح‌ریزی مسیر جدید برای بهره‌گیری از یک پرنده بدون سرنشین بال ثابت در محیط همراه با موانع به منظور ارائه مسیرهای جستجوی بهینه ارائه شده است. در این‌جا با رویکرد وجود عدم قطعیت در محل احتمالی اهداف مورد جستجو و با تدوین یک نقشه احتمالاتی گسسته از محیط جستجو، توسعه یک الگوریتم جستجوی کمینه زمان در حضور همزمان قید موانع و قید سینماتیکی پرنده مورد توجه می‌باشد. به طوری که به منظور اعمال قیود سینماتیکی با پیشنهاد توابع اکتشافی جدید در قالب یک الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان، طرح‌ریزی مسیر بهینه مقید برای این وسایل در محیط‌های شلوغ همراه با موانع ارائه شده است. به منظور اثبات عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های عددی به ازای شرایط و پارامترهای طراحی مختلف اجرا گردیده است. تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده از مأموریت‌های شبیه‌سازی شده تأیید کننده کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی در استخراج مسیرهای جستجوی کمینه زمان برای استفاده توسط وسایل پرنده بدون سرنشین بال ثابت و یا سایر وسایل پرنده با محدودیت سینماتیکی می‌باشد.

**واژه های کلیدی:** طرح‌ریزی مسیر- الگوریتم کلونی مورچگان- جستجو و نجات

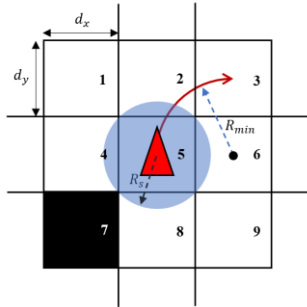
### ۱- مقدمه

پس از هر حادثه یا بلای طبیعی، امداد رسانی در کمترین زمان پارامتری کلیدی برای نجات افراد آسیب دیده می‌باشد. از این رو دست‌یابی به ایده‌ها، روش‌ها و ابزارهای متنوع برای افزایش سرعت و دقت در شناسایی بازماندگان و مجروحان، بسیار مورد توجه می‌باشد. امروزه اهمیت استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین به دلیل اندازه و هزینه پایین، توانایی مانورپذیری بالا و همچنین سهولت بکارگیری در مناطق مختلف در اجرای بسیاری از مأموریت‌ها به اثبات رسیده است. استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین برای جستجو و نجات آسیب دیدگان و بازماندگان بعد از بلایای طبیعی و یا افراد گمشده در مناطق وسیع از مهمترین کاربردهایی است که امروزه می‌توان برای این پرنده‌ها در نظر گرفت. در واقع پرنده‌های بدون سرنشین را می‌توان حسگرهای سیاری در نظر گرفت که توانایی گسترده برای جستجوی مناطق

با وسعت زیاد در کمترین زمان را دارا می‌باشند و از این رو می‌توانند تضمین کننده دست‌یابی به سرعت بالا در این گونه عملیات‌ها باشند [۱]. به طور کلی مسئله جستجو شامل سه رکن مهم محیط، جسم یا شخص مورد جستجو و جستجوگر می‌باشد. مسئله جستجوی یک فرد یا شی با موقعیت نامشخص توسط وسایل پرنده از سال ۱۹۷۵ به طور وسیع در مراجع مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. بررسی مراجع انتشار یافته اولیه نشان می‌دهد در سال‌های ابتدایی، توسعه و بررسی مدل‌های ریاضی (بدون توجه به قیود احتمالی بر روی جستجوگر) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با اثبات عدم کارایی مدل‌های ریاضی و روش‌های نامقید در برخی مسائل واقعی، لزوم توجه به قیود دینامیکی و سینماتیکی جستجوگر نیز در این مسائل مورد بررسی قرار گرفته است [۳].

در مراجع مختلف توابع عملکرد متفاوتی با مزایا و معایب مختلف در مسئله جستجو در نظر گرفته شده است. در این زمینه می‌توان به بیشینه نمودن احتمال یافتن هدف یا کمینه نمودن عدم شناسایی هدف [۴]، بیشینه نمودن اطلاعات به دست آمده در حین جستجو [۵]، بیشینه نمودن نرخ پوشش محیط [۶]، کمینه نمودن زمان جستجو برای یافتن هدف یا بیشینه نمودن تعداد اهداف یافت شده [۷] نام برد. یکی از روش‌های جامع و فراگیر در مسائل پوشش و جستجو، جستجوی انقاف است. این روش ممکن است در زمانی که هدف کاملاً ناشناخته است و همچنین احتمال وجود هدف در محیط دارای توزیع یکنواخت است، بهترین روش باشد. اما به صورت واضح مشخص است که در مسائل با محدودیت زمان (همانند جستجو و نجات) و یا در زمانی که اطلاعات اولیه نسبی در مورد هدف وجود دارد، از کارایی قابل توجهی برخوردار نیست [۸]. در مسئله جستجو در کمترین زمان، موقعیت دقیق هدف مشخص نمی‌باشد. اما با استفاده از یک تابع توزیع احتمالاتی که اطلاعات موقعیت هدف را مدل می‌سازد، موقعیت احتمالی هدف در محیط مشخص می‌شود. بر این اساس جستجوگر از جستجوی کل محیط اجتناب کرده و با هدف بیشینه نمودن احتمال یافتن هدف مبتنی بر اطلاعات در دسترس برای جستجوگر، زمان جستجو به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۹]. می‌توان گفت اساس این کار بر جستجو تحت عدم قطعیت یا جستجوی احتمالاتی می‌باشد که به طور ویژه بر روی الگوریتم‌های جستجوی کمینه زمان تمرکز دارد. نتایج حاصل شده از این دیدگاه مسیرهای جستجویی می‌باشد که زمان شناسایی هدف را کمینه می‌نماید. در این نوع مسائل زمان دقیق یافتن هدف به دلیل برخی عدم قطعیت‌ها در موقعیت هدف، دینامیک هدف و کارایی حسگرها عملاً غیر ممکن است. بنابراین در برخی مراجع همانند [۱۰] یک رویکرد مبتنی بر

سینماتیکی پرنده‌های بال ثابت، طول و عرض هر سلول از شبکه برابر با حداقل شعاع گردش مجاز به دست آمده برای پرنده به صورت  $d_x = d_y = R_{min}$  در نظر گرفته می‌شود. پس از شبکه‌بندی محیط جستجو، اطلاعات احتمالاتی در دسترس از موقعیت هدف با یک نقشه احتمالاتی گسسته بر روی فضای گسسته‌سازی شده مدل می‌شود. به طوری که این نقشه بیانگر توزیع احتمالاتی حضور هدف در قالب سلول‌هایی در هر گام زمانی از بازه جستجو می‌باشد. در صورتی که توزیع نقشه احتمالاتی هدف با  $P(v_i^k)$  بیان گردد، مجموع احتمال حضور هدف در کل فضای جستجو در ابتدای شروع جستجو برابر یک می‌باشد ( $v_i^k$  نشان دهنده موقعیت هدف در محل سلول  $i$  در زمان  $k$  است). با پیش‌روی الگوریتم و جستجوی هر سلول از شبکه تا زمان دست‌یابی به هدف مورد نظر، از میزان این احتمال به صورت گام به گام کاسته می‌شود. بدیهی است پس از عبور از هر سلول در صورت عدم شناسایی هدف، میزان احتمال حضور هدف در آن سلول به صفر تقلیل می‌یابد.



شکل ۱- شمائی از نحوه شبکه‌بندی محیط جستجو مبتنی بر موقعیت پرنده و شعاع دید حسگرهای جستجو

## ۲-۲- مدل هدف و مدل حسگر

در این جا فرض شده است که هدف دارای موقعیت ثابت و نامشخص در محیط بوده و توانایی ارسال سیگنال به صورت متقارن را دارا می‌باشد. به طوری که در هر سلول از شبکه، احتمال حضور هدف ثابت بوده و در طول زمان نیز بدون تغییر فرض می‌شود.

به منظور مدل‌سازی حسگر شناسایی هدف فرض می‌شود موقعیت حسگر دقیقاً منطبق بر موقعیت پرنده می‌باشد. همچنین با فرض این که حسگر به صورت پایین‌نگر توانایی پوشش همزمان و کامل سطح هر سلول را دارا می‌باشد، با قرارگیری پرنده در مرکز هر سلول، همانند آنچه در شکل ۱ نمایش داده شده است منطقه تحت پوشش حسگر دقیقاً یک دایره با شعاع  $R_s$  را پوشش خواهد داد. در این جا به منظور پوشش کامل هر سلول، شعاع دید حسگر برابر با  $R_s = \sqrt{2}R_{min}/2$  در نظر گرفته شده است.

مدل حسگر در نظر گرفته شده در این جا همانند [۱۰] یک تابع درست نمایی ایده‌آل می‌باشد که در شرایطی که هدف و پرنده در یک سلول قرار گیرند تابع احتمال در نظر گرفته شده مقدار یک و در شرایطی که هدف و پرنده در یک زمان در یک سلول قرار ندارند تابع احتمال مقدار صفر را باز خواهد گرداند. به این معنی که حضور همزمان هدف و پرنده در یک سلول به منزله شناسایی هدف در نظر گرفته خواهد شد. با تعریف  $z^k$ ،  $s^k$  و  $v^k$  به ترتیب به عنوان متغیرهای اندازه‌گیری حسگر، موقعیت پرنده و موقعیت هدف، مدل حسگر به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

کمینه نمودن مقدار مورد انتظار زمان شناسایی هدف (Expected Detection Time) مبتنی بر توابع احتمالاتی مدل‌کننده عدم قطعیت‌ها دنبال شده است.

مسئله جستجو یک مسئله زمان چندجمله‌ای غیر قطعی سخت، (nondeterministic polynomial-time hardness) که به طور مخفف با NP-hard نامیده می‌شود، است که در این مسئله تعداد راه حل‌های در دسترس برای جستجو به صورت نمایی نسبت به بُعد محیط و زمان جستجو افزایش می‌یابد. حل این مسائل با استفاده از روش‌های کلاسیک برای یافتن جواب دقیق کاری غیر عملی می‌باشد به طوری که در بیشتر موارد از روش‌های تخمین به منظور حل این مسائل استفاده شده است. برخی از روش‌های موثر برای حل این مسائل شامل جستجوی حریصانه، روش بهینه‌سازی کلونی مورچگان و دیدگاه‌های بیزین می‌باشد [۱۱-۱۴]. در تدوین یک الگوریتم طرح‌ریزی مسیر، طراح با توجه به مزایا و معایب نتیجه شده از هر یک از این روش‌ها، رویکردی مبتنی بر خواست مسئله برای استفاده از هر یک از این روش‌ها را در پیش خواهد گرفت.

در این مقاله با توجه به رویکرد دست‌یابی به مسیر جستجو برای شناسایی بازماندگان در کمترین زمان، در شرایط وجود عدم قطعیت‌های محیطی، استفاده از تابع عملکرد برای کمینه نمودن مقدار مورد انتظار زمان شناسایی مورد توجه می‌باشد. از این رو در این جا با بهره‌گیری و توسعه الگوریتم ارائه شده در [۱۰] و بهبود الگوریتم برای برآورده نمودن قیود سینماتیکی، مسیرهای جستجوی قابل پرواز با محدودیت‌های سینماتیکی وارد بر یک پرنده بدون سرنشین بال ثابت طرح‌ریزی شده است. در این راستا به منظور استخراج مسیرهای بهینه از روش بهینه‌سازی کلونی مورچگان به دلیل سهولت اعمال قیود مختلف در قالب جدول فرمون و اطلاعات اکتشافی استفاده شده است. بدیهی است الگوریتم طراحی شده با امکان پیاده‌سازی بر روی پرنده‌های بال ثابت و بال چرخان، در یافتن بازماندگان در کمترین زمان ممکن (در مناطق زلزله‌زده یا درگیر بلاهای طبیعی یا در هنگام بروز سوانح هوایی) کارایی قابل توجهی خواهد داشت. همچنین الگوریتم پیشنهادی به دلیل سهولت ایجاد تغییرات احتمالی، می‌تواند به سادگی در ربات‌های زمینی مسیریاب مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

## ۲-۲- مدل‌سازی مسئله طرح‌ریزی مسیر

به منظور تدوین الگوریتم طرح‌ریزی مسیر جستجوی بهینه، ابتدا باید مدل دقیق یا احتمالاتی سه رکن محیط، هدف و جستجوگر به عنوان اجزای اصلی مسئله مشخص گردد. از این رو در این قسمت مدل‌سازی این رکن‌ها در مسئله جستجو و تطبیق هر یک با الگوریتم بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفته و مدل‌های مقتضی برای تشکیل الگوریتم طرح‌ریزی مسیر تدوین گردیده است.

## ۲-۱- مدل محیط و نقشه احتمالاتی هدف

در این مقاله به دلیل رویکرد جستجو مبتنی بر روش‌های احتمالاتی و توجه به الگوریتم‌های جستجوی گسسته لازم است ابتدا محیط جستجو به منظور مطابقت با این روش‌ها به فضایی گسسته تقسیم‌بندی گردد. از این رو با فرض پرواز پرنده در ارتفاع ثابت می‌توان محیط جستجو را به یک فضای دو بعدی کاهش داده و آن را به یک نقشه شبکه‌بندی شده با ابعاد  $N_x \times N_y$  همانند شکل ۱ گسسته‌سازی نمود. به منظور انطباق نقشه گسسته‌سازی شده با قید

شده در [۱۰ و ۹] مقدار مورد انتظار برای زمان شناسایی هدف برای مسیر پرواز داده شده، به عنوان معیار تابع هزینه برای الگوریتم جستجو در نظر گرفته شده است. این تابع هزینه بر اساس فرضیات مطرح شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET(s^{0:k}) = \sum_{k=0}^N P(z^{0:k} = \bar{D} | s^{0:k}) = \sum_{k=0}^N \sum_{v^k \in N_x \times N_y} \bar{b}(v^k) \quad (2)$$

$$\bar{b}(v^k) = P(z^k = \bar{D} | v^k, s^k) \sum_{v^{k-1} \in N_x \times N_y} \bar{b}(v^{k-1}) \quad (3)$$

در رابطه (۲)،  $\bar{b}(v^k)$  به صورت یک تابع بازگشتی بر اساس رابطه (۳) قابل محاسبه است. به طوری که  $\bar{b}(v^0)$  برابر با نقشه احتمالاتی اولیه هدف می‌باشد.  $N$  نیز بیشینه گام زمانی در نظر گرفته شده برای الگوریتم است که بیانگر تعداد حداکثر فرامین کنترلی در کل مسیر پرواز طراحی شده می‌باشد.

در اغلب موارد معیار نرخ پوشش نیز به عنوان یک تابع هدف برای مسائل گشت و نظارت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. به دلیل این که الگوریتم جستجو با کمترین زمان تمایل به یافتن مسیریابی به منظور رسیدن به هدف با کمترین نرخ پوشش را دارد، تابع هدف نرخ پوشش در مسائل جستجو در مقابل آنچه که از تابع شناسایی هدف انتظار می‌رود قرار می‌گیرد. به طور کلی نرخ پوشش مبتنی بر رابطه (۴) نسبت سلول‌های جستجو شده به تمام سلول‌ها را در طول کل زمان پرواز نمایش می‌دهد. در این مقاله این معیار به طور مستقیم در الگوریتم جستجو تأثیری ندارد اما از این تابع در این جا تنها به منظور تحلیل و بررسی نتایج به ازای ورودی‌های مختلف بهره گرفته شده است.

$$Cov = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \frac{cell_{x,y}}{N_x \times N_y}, \quad cell_{x,y} \in \{0,1\} \quad (4)$$

#### ۴- الگوریتم بهینه‌ی جستجوی هدف

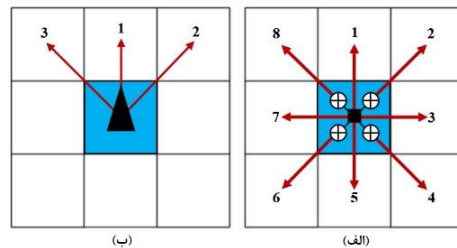
در حل مسئله جستجو، الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند متنوعی در مراجع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان، الگوریتم کلونی مورچگان یکی از الگوریتم‌های هوشمندی می‌باشد که به طور بسیار قابل ملاحظه‌ای نتایج قابل قبولی را برای استخراج جواب‌های بهینه در حضور قیود مختلف ارائه نموده است. به طور کلی در این الگوریتم با الهام از مسیریابی مورچه‌ها و مبتنی بر ایده تجمع فرومون بر مسیرهای حرکت مناسب‌تر، مسیر یا راه حل نهایی بهینه استخراج می‌گردد [۱۶]. به طور کلی انواع مختلفی از الگوریتم مورچگان در مراجع قابل مشاهده می‌باشد. کلیه این الگوریتم با حفظ ایده الگوریتم اصلی، اما قوانین مختلفی را برای به روز رسانی جدول فرومون به منظور اجتناب از کمینه‌های محلی به کار گرفته‌اند. علاوه بر فرومون‌ها استفاده از اطلاعات اکتشافی (heuristics information) نیز در افزایش سرعت نیل به جواب بهینه در این الگوریتم بسیار موثر واقع شده است. به طور کلی می‌توان گفت جدول فرومون،  $\tau$ ، و اطلاعات اکتشافی،  $\eta$ ، فاکتورهای تعیین کننده در هر تکرار از این الگوریتم می‌باشند. در الگوریتم توسعه یافته در این مقاله، در هر تکرار از الگوریتم با تخصیص مقادیر مناسب به هر یک از این پارامترها، الگوریتم فرمان بعدی را متناسب

$$\begin{cases} P(z^k | v^k, s^k) = 1 & \text{if } s^k = v^k \text{ and } z^k = D \\ P(z^k | v^k, s^k) = 0 & \text{if } s^k \neq v^k \text{ and } z^k = \bar{D} \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $D$  به معنی شناسایی هدف و  $\bar{D}$  به معنی عدم شناسایی هدف توسط پرنده می‌باشد. بر این اساس  $P(z^k | v^k, s^k) = 1$  به معنی احتمال حضور همزمان هدف و پرنده در زمان  $k$  در یک سلول و در نتیجه شناسایی هدف توسط پرنده است.

#### ۲-۳- مدل پرنده جستجوگر

به طور کلی در مسئله طرح‌ریزی مسیر پرواز یک پرنده، محدودیت سینماتیکی پرنده می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای راه حل‌ها و در نتیجه مسیرهای پرواز بدست آمده برای مأموریت جستجو را تحت تأثیر قرار دهد. در یک محیط شبکه‌بندی شده نقاط مرکزی هر سلول را می‌توان به عنوان نقاط راه مسیر پرواز پرنده در نظر گرفت. برای یک پرنده بدون محدودیت سینماتیکی شدید همانند یک پرنده چند پره (Multi-Rotor) عمود پرواز، در هر گام زمانی بدون توجه به لزوم پیوستگی مسیر پرواز و به دلیل توانایی پرواز ایستا در هر نقطه از مسیر پرواز، پرنده در هر سلول توانایی حرکت به ۸ سلول مجاور خود در محیط گسسته‌سازی شده همانند شکل ۲-الف را دارا می‌باشد. برای یک پرنده بال ثابت به دلیل لزوم پرواز پیوسته و عدم امکان پرواز ایستا و همچنین محدودیت حداکثر شعاع چرخش، عملاً با قرارگیری پرنده در هر سلول امکان دستیابی به تمام سلول‌های مجاور برای پرنده فراهم نمی‌باشد. به طوری که مبتنی بر زاویه سمت پرنده در لحظه  $k$  و همچنین اطلاعات به دست آمده از محیط، حداکثر سه سلول با زاویه  $\{-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ\}$  نسبت به زاویه سمت فعلی پرنده، برای انتخاب موقعیت پرنده در گام زمانی  $k+1$  قابل انتخاب می‌باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت موقعیت بعدی پرنده،  $s^{k+1}$ ، بر اساس مفهوم نمایش داده شده در شکل ۲ تابعی از موقعیت فعلی،  $s^k$ ، زاویه سمت،  $\psi^k$ ، و فرمان کنترلی،  $c^k$ ، به صورت  $s^{k+1} = f(s^k, c^k, \psi^k)$  می‌باشد.



شکل ۲- سلول‌های مجاور قابل انتخاب برای

(الف) پرنده با قابلیت پرواز ایستا و (ب) پرنده بدون قابلیت پرواز ایستا

#### ۳- تابع هدف برای مسئله جستجو

در مسئله جستجوی بازماندگان پس از هر حادثه، زمان شناسایی موقعیت افراد نیازمند کمک از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد به طوری که در صورت شناسایی سریع محل بازماندگان، امداد رسانی و نجات مصدومان با موفقیت بالایی همراه خواهد بود. به دلیل عدم قابلیت پیش‌بینی در شرایط بحرانی در وقوع حوادث، در مسئله جستجو در این زمینه عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارد که لزوم بررسی این مسئله از دیدگاه احتمالاتی را نمایان ساخته است. در اینجا نیز با توجه به این رویکرد و مبتنی بر پیشنهاد مطرح

صفر در نظر گرفته می‌شود و یا برای سلول شماره ۵، به غیر از دو حرکت منجر به رسیدن به سلول مانع، کلیه حرکات مجاز در نظر گرفته می‌شود. این نقشه فرمون در هر گام از الگوریتم کلونی مورچه باید بروز رسانی گردد. سه مرحله تقویت فرمون، تبخیر و محدود کردن به منظور به روز رسانی جدول فرمون به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tau(*c^k, *s^{k-1}) \leftarrow \tau(*c^k, *s^{k-1}) + \frac{1}{ET(*s^{0:k})} \quad (۶)$$

$$\tau(a, i) \leftarrow (1 - \rho) \tau(a, i) \quad (۷)$$

$$\tau(a, i) = \max\{\tau_{min}, \min\{\tau_{max}, \tau(a, i)\}\} \quad (۸)$$

به طوریکه  $*s^{0:k}$  بهترین حل بدست آمده از الگوریتم برای پرند به منظور جستجوی محیط و شناسایی هدف بر اساس نقشه احتمالاتی و فرضیات اولیه مسئله می‌باشد. همچنین  $\tau_{max}$  و  $\tau_{min}$  بر اساس روش معرفی شده در [۱۷] در هر گام از الگوریتم مبتنی بر سایر پارامترهای لحظه‌ای الگوریتم محاسبه می‌شود.

## ۴-۲- اطلاعات اکتشافی

الگوریتم کلونی مورچگان می‌تواند با استفاده از اطلاعات اکتشافی با سرعت بسیار بالاتری پاسخ بهینه را استخراج نماید. در واقع این اطلاعات علاوه بر اطلاعات فراهم شده توسط فرمون به صورت لحظه‌ای سایر اطلاعات اضافی را که می‌تواند در انتخاب‌های بعدی نقش داشته باشد را به الگوریتم اعمال نماید. در این مقاله از این اطلاعات به منظور اعمال قیود مختلف در مسئله استفاده شده است. برای مسئله طراحی شده دو قید جستجو در کمترین زمان و همچنین قید سینماتیکی پرند به صورت اطلاعات اکتشافی زیر در نظر گرفته شده است:

- قید جستجو در کمترین زمان  $(\eta_{MTS\_MEC}(a, s_i^k, k))$
- قید سینماتیکی  $(\eta_{Kin}(a, s_i^k, k))$

این اطلاعات در واقع هر یک ماتریسی به ابعاد  $1 \times 12$  را تشکیل می‌دهد که هر عضو ماتریس بیانگر یکی از فرمان‌های قابل اعمال برای پرند در سلول  $i$ -ام می‌باشد. برای هر عضو مقدار صفر به معنی عدم اجازه به فرمان متناظر و مقدار غیر صفر به معنی اجازه برای آن فرمان است. به طوریکه در نهایت به منظور اجماع در کلیه قیود، حاصل ضرب این قیود به صورت رابطه (۹) به عنوان اطلاعات اکتشافی اعمالی به الگوریتم در نظر گرفته خواهد شد:

$$\eta(a, s_i^k, k) = \eta_{MTS\_MEC}(a, s_i^k, k) \cdot \eta_{Kin}(a, s_i^k, k) \quad (۹)$$

در ادامه نحوه مقدار دهی به هر یک از این عضوهای ماتریس بررسی می‌گردد.

## ۴-۲-۱- قید جستجو در کمترین زمان و کوتاهترین مسیر

در اینجا به منظور اعمال قید جستجو در کمترین زمان روش پیشنهاد شده در [۱۰] به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و بهبود یافته است. در این روش پرند مبتنی بر نقشه احتمالاتی هدف، با تعیین هوشمند هر یک از عضوهای اطلاعات اکتشافی  $\eta_{MTS}$ ، به سمت نزدیکترین منطقه با بالاترین احتمال حضور هدف هدایت می‌گردد. در حقیقت برای هر سلول حاصل ضرب مقدار احتمال حضور هدف تخصیص داده شده در فاصله اقلیدسی آن سلول تا موقعیت پرند محاسبه شده و مقدار به دست آمده متناسب با هر فرمان

با این اطلاعات ارائه شده برای سلول جاری  $s^k$  انتخاب می‌کند. به طوریکه در هر گام از مراحل ساخت حل بهینه در این الگوریتم، احتمال هر یک از حرکات مجاز برای پرند، مبتنی بر پارامترهای  $\tau$  و  $\eta$  و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p(a, t) = \frac{(\tau[a, s^k])^\alpha (\eta[a, s^k])^\beta}{\sum_{a=1:Act} (\tau[a, s^k])^\alpha (\eta[a, s^k])^\beta} \quad (۵)$$

پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$ ، پارامترهایی با مقادیر مثبت هستند که مقدارشان، میزان اهمیت نسبی (وزن) اطلاعات فرمون (مقادیر متغیرهای یک جواب کاندید) و اطلاعات اکتشافی، در تولید مقدار احتمالی رابطه (۵) را مشخص می‌کنند. دقت در به روز رسانی صحیح پارامترهای  $\tau$  و  $\eta$  دست‌یابی به مسیر بهینه برای یافتن اهداف مورد نظر را تضمین می‌نماید.

## ۴-۱- فرمون

جدول فرمون اولیه برای مسئله جستجو مبتنی بر سلول‌های گسسته‌سازی شده و تمام فرامین و حرکات قابل اعمال برای پرند در هر سلول تنظیم می‌شود. به منظور مدل نمودن فرمان‌های مجاز در هر سلول از نقشه گسسته‌سازی شده، این جدول برخی محدودیت‌های نتیجه شده ناشی از مرزهای محیط و همچنین موانع را بیان خواهد کرد. برای یک پرند بدون سرنشین با محدودیت سینماتیکی، پرند در هر گام زمانی سه گزینه همانند جهات حرکت نمایش داده شده در شکل ۲-ب برای انتخاب پیش رو دارد. در صورتی که جهات حرکت مجاز در هر نقطه راه را تنها چهار جهت شمال، جنوب، شرق و غرب در نظر بگیریم، برای کل زوایای سمت احتمالی در یک سلول، دوازده گزینه برای فرمان‌های انتخابی در دسترس خواهد بود. به طوریکه پرند در هر گام زمانی امکان انتخاب یکی از این فرمان‌ها را خواهد داشت. با توجه به شکل ۲-الف برای هر یک از فرمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ برای پرند بال ثابت دو فرمان گردش در جهت راست و چپ در نظر گرفته می‌شود به طوری که با اضافه نمودن جهات حرکت مستقیم، جمعاً مجموعه‌ای با دوازده فرمان برای پرند در هر سلول در دسترس می‌باشد. بنابراین برای یک شبکه گسسته‌سازی شده با  $N_x \times N_y$  سلول می‌توان یک ماتریس با ابعاد  $12 \times (N_x \times N_y)$  را به عنوان جدول فرمون اولیه در نظر گرفت. به عنوان مثال برای شبکه  $3 \times 3$  از شکل ۱ ماتریسی با ابعاد  $12 \times 9$  به دست می‌آید و متناسب با این ماتریس برای هر سلول امکان انتخاب هر یک از فرامین وابسته به موقعیت آن سلول مشخص می‌شود. برای مقدار دهی اولیه برای این ماتریس، در سلول‌های مرزی فرامینی که پرند را به بیرون از محیط گسسته‌سازی هدایت می‌نماید به عنوان فرامین غیر مجاز تلقی شده و از لیست فرامین مجاز برای آن سلول خارج می‌شود. برای سلول‌های قرار گرفته در موانع، کلیه فرامین غیر مجاز برشمرده می‌شود و همچنین در سلول‌های قرار گرفته در نواحی مرزی فرامین هدایت کننده پرند به سمت موانع، غیر مجاز شمرده خواهد شد. برای فرامین غیر مجاز مقدار صفر در جدول فرمون لحاظ می‌گردد. برای سایر عضوهای ماتریس فرمون، مقدار دلخواه اولیه به طور مساوی در نظر گرفته می‌شود. این به این معنی است که در مقدار دهی اولیه مسئله جستجو، مقدار فرمون برای فرمان‌هایی که پرند را به سمت بیرون از محیط جستجو یا نواحی شامل موانع هدایت می‌کند برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای شبکه نمایش داده شده در شکل ۱ برای سلول شماره ۷، کلیه ۱۲ عضو از ستون هفتم ماتریس برابر

قابل انتخاب می‌باشد که پرنده را در راستای ورود و خروج یکسان از نقطه مسیر حفظ نماید. به این معنی که در انتخاب فرمان‌های مجاز برای پرنده در هر یک از نقاط راه با بکارگیری رویکرد طرح‌ریزی مسیرهای دیوبینس نحوه انتخاب پرواز بر روی خطوط مستقیم یا کمان‌ها مبتنی بر تکه مسیر قبلی پرنده می‌باشد. بر این اساس در این‌جا به منظور حفظ یکپارچگی مسیرهای دیوبینس، با در نظر گرفتن شروط نمایش داده شده در (۱۳) فرامین متناظر با قید سینماتیکی پرنده برای تشکیل اطلاعات اکتشافی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\eta_{Kin}(a, s_i^k, k) = \begin{cases} \begin{cases} 1 & \text{for } a = 1,2,12 \\ 0 & \text{other actions} \end{cases} & \text{if } \psi_k = 0 \\ \begin{cases} 1 & \text{for } a = 3,4,5 \\ 0 & \text{other actions} \end{cases} & \text{if } \psi_k = 90 \\ \begin{cases} 1 & \text{for } a = 6,7,8 \\ 0 & \text{other actions} \end{cases} & \text{if } \psi_k = 180 \\ \begin{cases} 1 & \text{for } a = 9,10,11 \\ 0 & \text{other actions} \end{cases} & \text{if } \psi_k = 270 \end{cases} \quad (13)$$

با تعریف کلیه پارامترهای تأثیر گذار در الگوریتم جستجو اکنون می‌توان به طور خلاصه شبه کد این الگوریتم را به صورت زیر نمایش داد.

شبه کد جستجوی بهینه مقید در حضور موانع با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان

مقدار دهی اولیه برای $\beta$ و $\alpha$ ، $\rho$ ، $\kappa$ ، $rS$
گسسته‌سازی محیط به شبکه با ابعاد $N_x \times N_y$
تدوین نقشه احتمالاتی از نواحی حضور افراد آسیب دیده، موانع و تهیه جدول فرمون اولیه
<b>حلقه اول:</b> تکرار الگوریتم به میزان مشخص
<b>حلقه دوم:</b> تکرار به میزان تعداد جمعیت مورچه‌ها
مقدار دهی نقشه احتمالاتی و کلیه پارامترها با مقادیر اولیه
<b>حلقه سوم:</b> تکرار به میزان افق دید مشخص
شناسایی موقعیت جاری پرنده
محاسبه اطلاعات اکتشافی مبتنی بر رابطه (۹)
محاسبه احتمال هر یک از حرکات مجاز مبتنی بر رابطه (۵)
انتخاب فرمان منطبق با بیشینه احتمال
به روز رسانی نقشه احتمالی هدف مورد جستجو
تعیین مقدار زمان مورد انتظار مبتنی بر رابطه (۲)
ذخیره نتایج به دست آمده برای هر گام از مسیر
<b>پایان حلقه سوم</b>
<b>پایان حلقه دوم</b>
ذخیره نتایج به دست آمده برای هر یک از اعضای جمعیت مورچه‌ها
انتخاب بهترین حل از میان جمعیت
به روز رسانی جدول فرمون مبتنی بر رابطه (۶)، (۷) و (۸)
<b>پایان حلقه اول</b>
انتخاب بهترین حل از میان کل تکرارهای الگوریتم و استخراج مسیر جستجوی بهینه

#### ۵- شبیه‌سازی

به منظور بررسی کارایی روش جستجوی پیشنهادی و ارزیابی نحوه اعمال قیود، یک مأموریت جستجو در یک منطقه مشخص با ابعاد ۲۰ کیلومتر در ۲۰ کیلومتر مربع، همراه با موانع مشخص در نظر گرفته شده است. به منظور اجرای مأموریت یک پرنده بال ثابت با حداقل شعاع گردش برابر با

برای عضو مربوطه در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این روش به تنهایی تأیید کننده دست‌یابی الگوریتم به مناطق با احتمال حضور هدف بیشتر می‌باشد. اما نکته قابل بررسی در این‌جا این است که اعمال قید سینماتیکی به طور قابل ملاحظه‌ای حرکت مستقیم به سمت سلول‌های با احتمال بیشتر را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در برخی موارد مانورهای غیر ضروری را برای پرنده در دستور کار قرار می‌دهد. به طور کلی اعمال قیود بیشتر بر الگوریتم بر حل بهینه مسئله تأثیر منفی گذاشته به طوری که مسیرهای نتیجه شده را از مسیرهای مستقیم بهینه با کمترین مصرف سوخت دور می‌سازد. در این‌جا به منظور اعمال فرمان‌های منتج به مسیرهای کوتاه‌تر، با اعمال یک ضریب تأثیر  $\kappa$  به صورت رابطه (۱۰) بر تابع اکتشافی جستجو در حداقل زمان، الگوریتم برای استخراج مسیریابی با کمترین مصرف سوخت بهبود می‌یابد.

$$\eta_{MTS\_MEC}(a, s_i^k, k) = \kappa \cdot \eta_{MTS}(a, s_i^k, k) \quad (10)$$

مقدار پارامتر  $\kappa$  به صورت رابطه زیر با اعمال ضریب ثابت برای افزایش شانس انتخاب مسیرهای مستقیم بر تابع اکتشافی جستجو در حداقل زمان تأثیر می‌گذارد. بر اساس بررسی و سعی و خطای صورت گرفته مقدار ۱/۵ برای پارامتر  $\kappa$  به عنوان مقدار مقتضی در نظر گرفته شده است.

$$\kappa = \begin{cases} 1.5 & a_k \in \{1,4,7,10\} \\ 1 & \text{other actions} \end{cases} \quad (11)$$

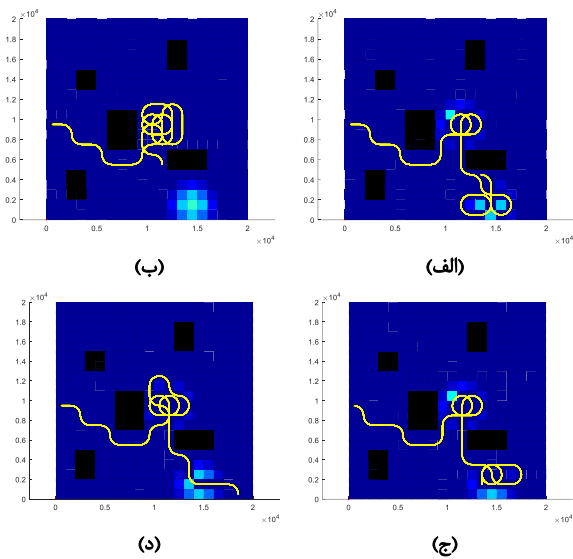
#### ۴-۲-۲- قید سینماتیکی

یک پرنده بال ثابت به دلیل طبیعت حرکت پیوسته و عدم توانایی در پرواز ایستا دارای محدودیت‌های دینامیکی و سینماتیکی در مسیر پرواز خود می‌باشد. به طوری که بر خلاف یک پرنده چند پره عمود پرواز امکان توقف در مسیر و تغییر جهت ناگهانی نداشته و از این‌رو روش‌های طراحی مسیر برای پرنده‌های بال ثابت در این زمینه با چالش‌هایی همراه می‌باشد. بر اساس روش گسسته‌سازی شده در اینجا در هر گام زمانی به دلیل این محدودیت سینماتیکی (و بدون سایر محدودیت‌ها) تنها سه گزینه از دوازده فرمان و سمت حرکت در اختیار پرنده می‌باشد. این فرمان‌های مجاز شامل یک فرمان حرکت مستقیم و دو فرمان مانور چرخش با حداقل شعاع به سمت راست و چپ می‌باشد. به دلیل اهمیت در طراحی کوتاه‌ترین مسیرها در مأموریت جستجو باید کوتاهترین مانورها بین دو سلول در نظر گرفته شود. در [۱۸] ثابت شده است که برای حرکت بین دو نقطه با زاویه مشخص، مسیر دیوبینس که متشکل از خطوط مستقیم و کمان‌های انحنا ثابت می‌باشد کوتاهترین مسیرهای ممکن را نتیجه خواهد داد. از این‌رو در این‌جا نیز از این مسیرها در ساخت هر تکه از مسیر بین دو سلول متوالی استفاده شده است. کمان‌های انحنا ثابت در این مسیرها در واقع کمان‌هایی با شعاع حداقل گردش پرنده می‌باشد که در صورت در نظر گرفتن  $V$  به عنوان سرعت پرنده،  $g$  به عنوان شتاب جاذبه و  $n$  به عنوان بیشینه ضریب بار مجاز بر پرنده، می‌توان حداقل شعاع چرخش را به صورت زیر محاسبه نمود [۱۹]:

$$R_{min} = \frac{V^2}{g\sqrt{n^2 - 1}} \quad (12)$$

بر اساس فرض در نظر گرفته شده، پرنده در نقطه مرکزی هر سلول باید دارای زاویه سمت ۰، ۹۰، ۱۸۰ یا ۲۷۰ درجه در دستگاه مختصات شمال-شرق-پایین (NED) باشد. بر این اساس به منظور حفظ پیوستگی مسیر پرواز بر اساس زاویه ورود پرنده به نقطه مسیر در سلول  $i$ -ام، فرمان‌هایی

نتایج نمایش داده شده در جدول ۱ به طور کلی بیانگر این است که وزن‌دهی بیشتر به اطلاعات اکتشافی علاوه بر کاهش زمان مورد انتظار برای شناسایی هدف مورد جستجو، افزایش نرخ پوشش محیط را نیز به همراه داشته است. به این معنی که با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$ ، با اجازه برای اثر بخشی بیشتر اطلاعات اکتشافی نسبت به فرومون، از جستجوی تکراری سلول‌ها تا حد بسیار زیادی جلوگیری شده است. در شکل ۴ نتیجه این تغییرات در مسیر نهایی جستجو نیز برای چهار حالت نمایش داده شده بررسی شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مسیر به دست آمده در شرایط افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  (در بازه صفر تا یک) نسبت به سایر شرایط از مقبولیت بیشتری برخوردار می‌باشد. این مقبولیت شامل پوشش کلیه مناطق با احتمال حضور بیشتر بازماندگان، عدم پوشش تکراری محیط و توزیع یکنواخت مسیره‌ها می‌باشد.



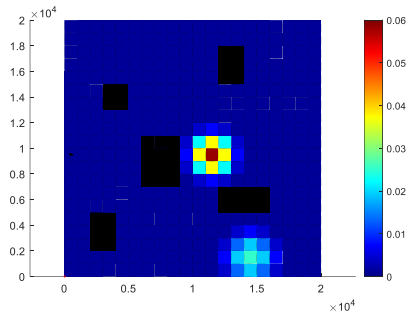
شکل ۴- نمایش مسیر جستجوی بدست آمده به ازای  
 (الف)  $\alpha = 0.6$  &  $\beta = 1.0$  (ب)  $\alpha = 1.0$  &  $\beta = 1.0$   
 (ج)  $\alpha = 1.0$  &  $\beta = 0.6$  (د)  $\alpha = 1.0$  &  $\beta = 2.0$

در میان شرایط بررسی شده در جدول ۱ و شکل ۴ مقدار  $0.7/\alpha$  و  $\beta$  متضمن جستجو با کمترین زمان مورد انتظار و همچنین کمترین احتمال باقیمانده برای حضور هدف در نواحی جستجو نشده، در این مأموریت خواهد بود. از این رو در ادامه به منظور بررسی سایر ویژگی‌ها، از این مقادیر به عنوان مقادیر بهینه برای این پارامترها استفاده شده است.

#### ۲-۵- بررسی اثر اعمال قیود مختلف

به منظور بررسی تأثیر قیود اعمال شده بر الگوریتم، به ازای شرایط اولیه ثابت، الگوریتم برای افق دید ثابت برابر با ۴۰ اجرا گردیده است. در مرحله اول الگوریتم تنها با وارد ساختن قید عدم برخورد (اعمال در جدول فرومون) و بدون اعمال هیچ یک از سایر قیود اجرا گردیده است. نتیجه این شرایط در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مسیر به دست آمده به طور مناسب به سمت نواحی احتمالی هدف حرکت ننموده است و همچنین وجود تغییر زوایای حاده در مسیر امکان پیگیری مسیر برای پرند ثابت را فراهم نمی‌نماید. در مرحله دوم با اضافه نمودن قید کمترین زمان جستجو و سپس قید کوتاه‌ترین مسیر، الگوریتم اجرا گردیده

۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. بر اساس این ویژگی منطقه جستجو به یک شبکه با ابعاد  $20 \times 20$  سلول گسسته‌سازی شده است. نقشه احتمالاتی اولیه منطقه جستجو در اینجا همانند شکل ۳ در نظر گرفته شده است. به طوریکه سلول‌هایی با رنگ گرم‌تر بیانگر احتمال حضور بیشتر هدف و همچنین سلول‌های سیاه بیانگر موانع موجود در محیط می‌باشد. به منظور مدل‌سازی حضور هدف در نواحی مشخص شده توابع نمایی با مرکزیت یک سلول در نظر گرفته شده است به طوری که با دور شدن از مرکز آن سلول احتمال حضور هدف نیز کاهش می‌یابد. رنگ‌های نمایش داده شده در تصویر بیانگر مدل‌سازی حضور هدف در محیط می‌باشد. به عنوان یک مأموریت فرض شده است دو ناحیه برای حضور افراد آسیب دیده در منطقه وجود دارد. به طوریکه بر اساس اطلاعات احتمالی یک ناحیه با احتمال بیشتر و یک ناحیه با احتمال کمتر در نقشه احتمالاتی اولیه به الگوریتم وارد می‌گردد. انتظار می‌رود الگوریتم مسیره‌های جستجوی ایمن را به گونه‌ای طرح‌ریزی نماید که نواحی با احتمال بیشتر در اولویت جستجو قرار داشته باشد.



شکل ۳- نمایش نقشه احتمالاتی اولیه و گسسته‌سازی محیط

#### ۵-۱- بررسی اثر پارامترهای $\alpha$ و $\beta$

به منظور بررسی اثر پارامترهای تأثیر گذار در نتایج الگوریتم، تغییرات دو پارامتر  $\alpha$  و  $\beta$  مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن افق دید (N) برابر ۴۰ و همچنین جمعیتی با ۵۰ عضو و فراهم نمودن امکان ۱۵۰ تکرار از الگوریتم، به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  و  $\beta$  برنامه اجرا گردیده و نتایج به دست آمده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- مقایسه تأثیر پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  بر نتایج الگوریتم جستجو

احتمال باقیمانده برای حضور هدف	نرخ پوشش	زمان مورد انتظار	$\beta$	$\alpha$
۰/۲۷	۰/۰۹۳	۲۶/۴۰	۱	۰/۵
۰/۳۴	۰/۰۹۲	۲۷/۲۵	۱	۰/۶
۰/۲۶	۰/۰۹۰	۲۶/۱۳	۱	۰/۷
۰/۲۹	۰/۰۹۰	۲۶/۱۳	۱	۰/۸
۰/۲۹	۰/۰۹۰	۲۶/۸۳	۱	۰/۹
۰/۳۲	۰/۰۹۵	۲۶/۵۵	۱	۱
۰/۴۱	۰/۰۸۳	۲۶/۵۳	۰/۹	۱
۰/۳۷	۰/۰۸۲	۲۶/۵۲	۰/۸	۱
۰/۳۲	۰/۰۹۳	۲۶/۵۶	۰/۷	۱
۰/۴۱	۰/۰۸۳	۲۷/۲۴	۰/۶	۱
۰/۴۰	۰/۰۷۵	۲۷/۲۷	۰/۵	۱

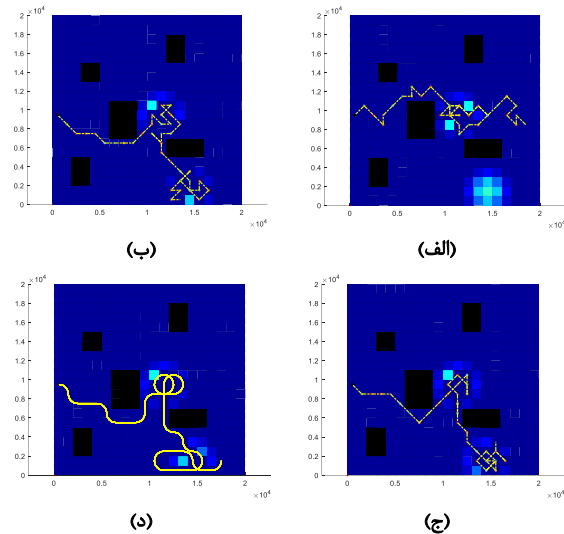
#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله توسعه یک الگوریتم جستجو برای طرح‌ریزی مسیر پرواز بهینه به منظور استفاده توسط یک پرنده بدون سرنشین بال ثابت در یک عملیات جستجو و نجات مورد توجه قرار گرفته است. در این جا با توسعه یک الگوریتم جستجو مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان و تعریف توابع اکتشافی جدید، قیود سینماتیکی ناشی از محدودیت‌های حرکتی وسایل پرنده بال ثابت به همراه قیود جستجو در کمترین زمان در طراحی مسیرهای ایمن در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از عدم اطلاع از موقعیت دقیق هدف‌های جستجو، این الگوریتم توانایی استخراج مسیر جستجوی ایمن و بهینه را با دقت بسیار بالایی فراهم نموده است. به طوریکه در طرح‌ریزی مسیر ایمن قابل پرواز، مناطق با احتمال بیشتر برای حضور هدف در اولویت جستجو قرار گرفته و در نتیجه احتمال کشف و شناسایی هدف در زمان کمتر به مقدار بسیار قابل توجهی افزایش یافته است. مجموع نتایج به دست آمده نشان می‌دهد استفاده از این روش به ویژه در یک عملیات جستجو و نجات می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دست‌یابی سریع به بازماندگان و موفقیت مأموریت داشته باشد. به دلیل سهولت به کارگیری، این الگوریتم علاوه بر قابلیت استفاده برای وسایل پرنده، با تغییرات اندک در زمینه مدل حسگرهای شناسایی، برای ربات‌های زمینی شبیه اتومبیل با محدودیت در شعاع چرخش نیز در مأموریت‌های مشابه قابل کاربرد می‌باشد.

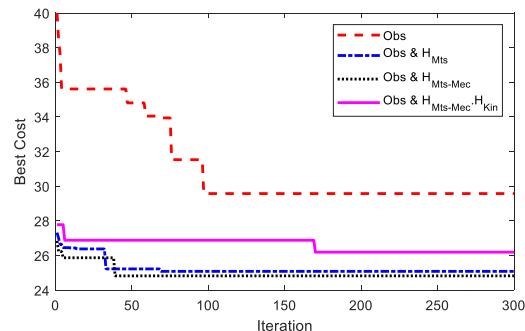
#### ۷- مراجع

- [1] M. Raap, S. Meyer-Nieberg, S. Pickl, and M. Zsifkovits, "Aerial vehicle search-path optimization: A novel method for emergency operations," *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 172, no. 3, pp. 965–983, 2017.
- [2] L. D. Stone, *Theory of optimal search*. Elsevier, 1976.
- [3] J. N. Eagle, "The optimal search for a moving target when the search path is constrained," *Oper. Res.*, vol. 32, no. 5, pp. 1107–1115, 1984.
- [4] Z. Qiming, W. Husheng, and F. Zhaowang, "A review of intelligent optimization algorithm applied to unmanned aerial vehicle swarm search task," in *2021 11th International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, 2021, pp. 383–393.
- [5] G. Hoffmann, S. Waslander, and C. Tomlin, "Distributed cooperative search using information-theoretic costs for particle filters, with quadrotor applications," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006, p. 6576.
- [6] S. W. Cho, H. J. Park, H. Lee, D. H. Shim, and S.-Y. Y. Kim, "Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 161, no. November 2020, p. 107612, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107612.
- [7] Z. Zhen, Y. Chen, L. Wen, and B. Han, "An intelligent cooperative mission planning scheme of UAV swarm in uncertain dynamic environment," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 100, p. 105826, 2020.
- [8] P. Yao, H. Wang, and H. Ji, "Gaussian mixture model and receding horizon control for multiple UAV search in complex environment," *Nonlinear Dyn.*, vol. 88, no. 2, pp. 903–919, 2017.

است. نتایج نمایش داده شده شکل ۵-ب نشان می‌دهد مسیرهای به دست آمده با همگرایی به سمت ناحیه هدف، توزیع یکنواختی را در محیط فراهم نموده است. اعمال قید کوتاهترین مسیر از اعمال مانورهای غیر ضروری در محیط جلوگیری نموده و پرنده را مستقیماً به سمت ناحیه هدف راهنمایی می‌نماید. در آخرین مرحله با افزایش قید سینماتیکی به مسئله، مسیرهای شدنی نمایش داده شده در شکل ۵-د با ترکیب بسیار مناسبی استخراج گردیده است. به منظور بررسی میزان زمان مورد انتظار شناسایی هدف به دست آمده برای هر یک از حالات بررسی شده، نمودار تغییرات این پارامتر به ازای هر یک از تکرارهای الگوریتم در شکل ۶ نمایش داده شده است. واضح است در شرایط اعمال قید کمترین زمان جستجو به همراه قید موانع، زمان مورد انتظار برای شناسایی کاهش یافته است. همچنین اضافه نمودن قید کوتاهترین مسیر تأثیر مثبت در کاهش این پارامتر نسبت به حالت‌های قبلی داشته است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که افزایش قید سینماتیکی باعث افزایش این زمان گردیده است. افزایش این زمان امری طبیعی است زیرا با محدود کردن انتخاب فرامین مجاز به دلیل محدودیت‌های سینماتیکی، وسیله پرنده ناچاراً مسیرهای با طول بیشتر اما قابل پرواز را در بر دارد. به طور کلی می‌توان گفت اعمال کلیه قیود در الگوریتم و مشاهده نتایج به دست آمده بیانگر موفقیت الگوریتم در استخراج مسیرهای جستجو با کمترین زمان برای یک پرنده بال ثابت می‌باشد.



شکل ۵- نمایش مسیر جستجوی بدست آمده به ازای (الف) قید عدم برخورد با موانع (ب) قید عدم برخورد و کمترین زمان (ج) قید عدم برخورد، کمترین زمان و کوتاهترین مسیر (د) قید عدم برخورد، کمترین زمان، کوتاهترین مسیر و قید سینماتیکی



شکل ۶- نمایش تغییرات زمان مورد انتظار برای شناسایی هدف

- [9] S. Perez-Carabaza, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco, and M. Jesus, "Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains," *Appl. Soft Comput.*, vol. 62, pp. 789–806, 2018.
- [10] S. Pérez-Carabaza, J. Scherer, B. Rinner, J. A. López-Orozco, and E. Besada-Portas, "UAV trajectory optimization for Minimum Time Search with communication constraints and collision avoidance," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 85, no. June, pp. 357–371, 2019, doi: 10.1016/j.engappai.2019.06.002.
- [11] M. D. Phung and Q. P. Ha, "Motion-encoded particle swarm optimization for moving target search using UAVs," *Appl. Soft Comput.*, vol. 97, p. 106705, 2020.
- [12] M. Morin, I. Abi-Zeid, and C.-G. Quimper, "Ant colony optimization for path planning in search and rescue operations," *Eur. J. Oper. Res.*, 2022.
- [13] L. Li, X. Zhang, W. Yue, and Z. Liu, "Cooperative search for dynamic targets by multiple UAVs with communication data losses," *ISA Trans.*, vol. 114, pp. 230–241, 2021.
- [14] D. Liu, W. Bao, X. Zhu, B. Fei, T. Men, and Z. Xiao, "Cooperative Path Optimization for Multiple UAVs Surveillance in Uncertain Environment," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 13, pp. 10676–10692, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3125784.
- [15] A. I. Hentati, L. C. Fourati, and J. Rezgui, "Cooperative UAVs framework for Mobile Target Search and tracking," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 101, p. 107992, 2022.
- [16] M. Dorigo and G. Di Caro, "Ant colony optimization: a new meta-heuristic," in *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, 1999, vol. 2, pp. 1470–1477.
- [17] H. H. Hoos and T. Stützle, "MAX MIN Ant System," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 16, no. November 1999, pp. 889–914, 2000.
- [18] L. E. Dubins, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents," *Am. J. Math.*, vol. 79, no. 3, pp. 497–516, 1957.
- [19] J. Roskam and C.-T. E. Lan, *Airplane aerodynamics and performance*. DARcorporation, 1997.