

# بهینه‌سازی هیورستیکی زمان بازبینی نظارت مداوم چندعاملی با استفاده از توابع وزنی کمترین مسافت

حسن حقیقی<sup>۱</sup>، سید حسین ساداتی<sup>۲</sup>، جلال کریمی<sup>۳</sup>، سید محمدمهدی دهقان<sup>۴</sup>

۱ دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲ دانشیار، مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، hsadati@mut.ac.ir

۳ و ۴ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵

## چکیده

از جمله مسائل پرکاربرد در زمینه گشت‌زنی هوایی، پیمایش مرزی، نجات و جستجو نظارت مداوم است و وجه تمایز آن با دیگر مسایل زمان بازبینی محدوده‌های مهم می‌باشد. به عبارت دیگر، تمرکز اصلی مسئله بر زمان بین دو بازدید متوالی یک منطقه مشخص است؛ هرچه این زمان کوتاه‌تر باشد، تغییرات و جزئیات دینامیک محدوده با دقت بالاتری در گشت‌زنی‌ها رصد می‌شود. در این مقاله برای دستیابی به کمترین زمان بازبینی از یک تابع هیورستیک مبتنی بر زمان عمر محدوده و مکان نقاط استفاده شده است. این تابع ارزش هر نقطه را براساس توابع وزنی تعریف می‌نماید که با بهینه‌سازی این ضرایب توسط الگوریتم ژنتیک می‌تواند کمترین زمان بیشینه بازبینی را برای تمامی گره‌ها در چندین تکرار متوالی محاسبه کند. مقدار بهینه این ضرایب وزنی تابع مکان نقاط و تعداد عامل‌ها بوده و برای هر مسئله یک مقدار یکتاست. در مسائل چندعاملی با افزودن تعداد توابع وزنی و تعریف توابع هیورستیک از دیدگاه کلی، رویکرد پیمایش مشخص می‌شود. در این مقاله، با تفکیک پیمایش به شیوه‌های پایه چمن‌زنی و حلزونی، ضمن محاسبه کمترین زمان بازبینی در محیط پیوسته، معیاری برای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج استخراج شده است. نتایج سبب پیمایش بهینه و هدفمند مجموعه‌ای از نقاط با اهمیت یک محدوده، در زمانی کمتر و با توجه به قابلیت‌های دینامیکی پرنده است.

## واژگان کلیدی

نظارت مداوم، پیمایش چندعاملی، گشت‌زنی مرزی، زمان بازبینی، تابع هیورستیک

### ۱. مقدمه

جدید در تعریف مأموریت‌های هوایی به‌همراه داشته است. در سال‌های اخیر، پهپادها از لحاظ سخت‌افزاری پیشرفت‌های قابل

امروزه استفاده روزافزون پهپادها در مأموریت‌های هوایی به‌دلالی چون هزینه کمتر و امنیت بیشتر فراگیر شده و پیدایش رویکردهایی

ملاحظه‌ای داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که با استفاده از حسگرهای مناسب، سامانه‌های محاسباتی داخلی، ذخیره‌سازی انرژی و سایر سامانه‌ها می‌توان تعداد زیادی از پهپادهای مختلف با قابلیت انجام مأموریت‌های متنوع تولید کرد [۱]. بسیاری از مأموریت‌ها همانند نظارت مداوم نیازمند پروازهای طولانی، هماهنگی و همکاری تعداد زیادی از پهپادها برای رسیدن به اهداف مأموریت است. از اینرو این‌گونه مأموریت‌ها برای کاهش هزینه و محدودیت‌های استفاده از نیروی انسانی برای هر پرنده، نیاز به سطح بالایی از خودکاربودن این سامانه‌ها دارند. در صورت اعمال رویکردهای طراحی برای استفاده از تجهیزات ارزان و حذف برخی پیچیدگی‌ها می‌توان از پهپادهای ارزان در تعداد زیاد و به‌صورت دسته‌های چندفروندی در این مأموریت‌ها استفاده کرد در این صورت نیاز است که برخی ملاحظات و قیدها در طراحی لحاظ و برخی کمبودها را با اعمال الگوریتم‌های مناسب جبران کرد [۲]. نظارت یا پایش مداوم یک منطقه زیرنظرگیری تحرکات و تغییرات یک منطقه را به‌عنوان هدف دنبال می‌نماید. در این راستا نیاز است که تمامی نقاط پهنه مورد نظر یا حداقل بخش‌های با اهمیت‌تر آن مورد بازدید پیوسته و مداوم قرار گیرد. مأموریت نظارت مداوم به‌دلیل نیاز به مداومت پروازی بالا و مشاهده پیوسته محیط معمولاً توسط پهپادها، به‌دلیل داشتن راندمان و قابلیت اطمینان بالا و به‌صورت پروازهای گروهی، انجام می‌شود.

مسائل پوشش‌دهی و نظارت مداوم را می‌توان از دو دیدگاه سلولی و پیوسته مورد بررسی قرار داد. در دیدگاه سلولی محیط به سلول‌ها یا محدوده‌های مشخص و محدودی تجزیه می‌شود که تمرکز اصلی روی این سلول‌ها یا محدوده‌ها خواهد بود و بازیابی یا شناسایی روی این سلول‌ها انجام خواهد گرفت [۳-۴]. در دیدگاه پیوسته هر نقطه از مسیر اهمیت یک سلول را خواهد داشت و پردازش روی کل نقاط یک مسیر انجام خواهد شد [۵].

هر دو رویکرد معایب و مزایایی دارد که بعضاً به نوع مأموریت مورد نظر وابسته است. دیدگاه محدوده‌های با اهمیت منجر به پایش بیشتر نقاط حساس می‌شود، اما از دیگر نقاط معمولاً غافل است، در حالی که دیدگاه سلولی با وجود تأخیر در پایش برخی نقاط کل محدوده را زیر نظر خواهد داشت.

پژوهش‌های متنوعی در زمینه طراحی مسیر، مسیره‌های پروازی امکان‌پذیر و بهینه‌سازی در جستجو و نظارت‌های محیطی انجام شده است. برای یافتن مسیره‌های بهینه در مأموریت‌های

پوشش‌دهی و نظارت چندعاملی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی متنوعی پیشنهاد شده است. مرجع [۶] با استفاده از شیوه برنامه‌ریزی پویای قطعی اقدام به طراحی مسیر بهینه نموده است. کریشنا و همکاران (۲۰۰۵) اقدام به کنترل پارامتری سامانه‌های چندفروندی پهپاد و پیاده‌سازی مأموریت جستجو روی محیط متخاصم با استفاده از الگوریتم \*A\* نموده‌اند [۷]. چنین ساختارهای بهینه‌سازی در الگوهای دیگر پیمایشی و طراحی مسیر همزمان نیز استفاده شده است [۸]. روش‌هایی چون بهینه‌سازی ازدحام ذرات، سازوکار فرمون دیجیتال و میدان پتانسیل برای مأموریت دسته‌های پهپاد استفاده شده است [۹-۱۰].

در مرجع [۱۱] الگوریتمی برای طراحی مسیر هماهنگ دسته‌ای از پهپادهای بال‌ثابت در راستای مأموریت نظارت مداوم انجام شده است. در این مرجع نیازمندی‌های مأموریت با قابلیت‌های دوربین زمینی پرنده تلفیق و راه‌کارهایی برای شعاع چرخش پرنده ارائه شده است و برای طراحی مسیر بهینه نیز از ساختار Spline و جستجوی گراف استفاده نموده است.

بتک و همکاران (۲۰۰۸) ساختاری برای مدیریت سلامتی در مأموریت‌های نظارت مداوم تدوین کرده‌اند [۱۲]. این ساختار به پایش لحظه‌ای سوخت و وضعیت پرنده‌ها برای انتقال مأموریت یا جایگزینی آنها در این مأموریت می‌پردازد. در پژوهشی مشابه نیز ساختاری برای مدیریت نیرو و باتری در مأموریت‌های نظارت مداوم معرفی شده است [۱۳].

در مسائل پوشش‌دهی، هدف پوشش کامل یک منطقه است به‌گونه‌ای که حوادث روی داده در محدوده، کشف یا پیگیری شده و یا منطقه به‌طور کامل با اجزای مرتبط شناسایی گردد. اما در مسائل نظارت مداوم، بخش مهم و متمایز آن با دیگر مأموریت‌ها، زمان بازیابی<sup>۱</sup> یک نقطه یا محدوده بعد از آخرین دیدار آن نقطه است. هرچه این زمان، که به‌عنوان زمان عمر آن محدوده تلقی می‌شود، کمتر گردد، نظارت با پایداری و دقت بیشتری همراه است [۱۴]. مرجع [۱۵] با استفاده از یک دستگاه مختصات مکانی - زمانی مسئله پوشش‌دهی خطی چندعامله را بررسی و الگوهایی برای محاسبه درصد پوشش و افزایش کارایی جستجو و مکان باندهای پروازی پیشنهاد نموده است که مبنایی برای برخی تصمیم‌گیری‌های مقاله حاضر در ارزیابی‌های زمانی خواهد بود.

در موضوع نظارت مداوم سه نکته اساسی مطرح است: نکته نخست شیوه گشت‌زنی است که با توجه به مرزهای ناحیه ممکن

الگوی پیوسته پایه ارائه شده و در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی ارزیابی و نتیجه‌گیری کلی بیان می‌شود.

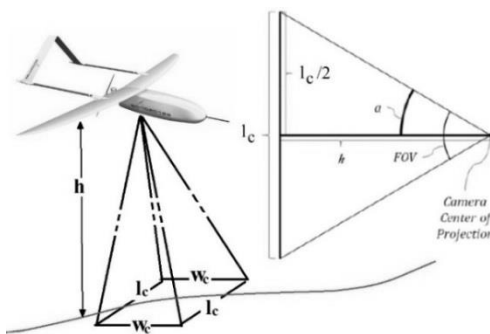
## ۲. مبانی نظارت مداوم

نظارت مداوم، زیر نظر گرفتن یک منطقه به‌گونه‌ای است که ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی محیط و محدوده کشف‌شده و کلیه تغییرات، مورد رصد پایدار قرار گیرد. در سیستم‌های هوایی، نظارت و هدایت مبتنی بر آن بر پایه حسگر خواهد بود؛ به این مفهوم که اطلاعات محیط توسط حسگرهای تعبیه‌شده روی پرنده‌ها اخذ و تجزیه و تحلیل می‌شود و از این شیوه راهبرد مشخصی برای پیمایش آینده تصمیم‌گیری می‌شود. اساساً از دو شیوه اساسی برای پیمایش و پایش محیط استفاده می‌شود: پیمایش مبتنی بر نقاط یا محدوده‌های مهم و پیمایش پیوسته محیط. در پیمایش‌های مبتنی بر نقاط با اهمیت، با در نظر گرفتن این نکته که تمام محدوده از ارزش پایش یکسانی برخوردار نیستند، محیط مورد جستجو، به مناطق محدودی به‌عنوان نقاط با اهمیت تقسیم‌بندی شده و تنها این نقاط مورد پیمایش قرار خواهند گرفت. چنانچه اطلاعات ارزش لحظه‌ای نقاط تغییر کند یا نقاط با اهمیت جدیدی به مجموعه اضافه شود، این تغییرات باید به اطلاعات محیطی سامانه اضافه شود. در شیوه پیمایشی پیوسته تمامی نقاط محیط از ارزش یکسانی برخوردار بوده و توزیع حضور در نقاط مختلف محدوده باید به توزیع یکنواخت نزدیک گردد. در واقع پهنه مورد جستجو مجموعه‌ای پیوسته از نواحی با ارزش بازبینی یکسان در نظر گرفته می‌شود که باید پیمایش گردند. بنابراین از این دو رویکرد گفته‌شده برای فرمول‌بندی مسئله استفاده می‌شود. مهم‌ترین پارامتر در تعیین شیوه نظارت و بررسی عملکرد پایش زمان بازبینی است. زمان بازبینی نقطه تفاوت مسئله‌های نظارت مداوم با سایر مسایل جستجو و پیمایش است. هرچه اندازه این پارامتر کمتر باشد، مسئله به پهنگی مورد نظر نزدیک‌تر شده و عملکرد نظارت مطلوب‌تر خواهد بود. برای کاهش این زمان با توجه به پارامترهای عملکردی، معمولاً از شیوه‌های متنوعی استفاده می‌شود. ایجاد تغییرات در پارامترهای پروازی و حسگری، افزایش تعداد عامل‌های پروازی و طراحی بهینه مسیر چه در تک‌عاملی و چه در رویکرد چندعاملی استفاده می‌شود. مسئله نظارت مداوم از دیدگاه‌های متنوعی فرمول‌بندی می‌شود. یک شیوه فرمول‌بندی، که در این مقاله نیز به‌کار رفته

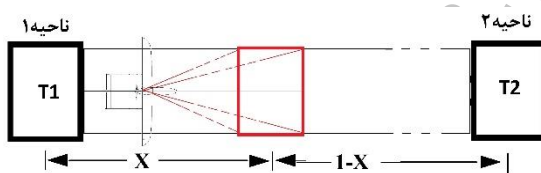
است شیوه‌هایی خاص و قیده‌های متنوعی مطرح شود. نکته دوم میزان مساحت جستجو‌شده یا زمان جستجوی کل محدوده است و نکته سوم، که سهم مهمی در مسئله نظارت مداوم دارد و اساس مسئله بر آن استوار است، زمان بازبینی یک نقطه در محدوده است. روش‌های مختلفی که در این مقاله بیان می‌شوند، بر این پارامتر برای بیان ارزیابی و کارایی روش تأکید می‌نمایند. شیوه‌های گشت‌زنی ابتکاری یا مبتنی بر الگوهای تصادفی و یا شیوه‌های مبتنی بر مانورها و حرکات‌های هدف معمولاً در بحث فرمول‌بندی پایه نظارت مداوم استفاده نمی‌شوند و باید با توجه به شرایط خاص وسیله پرنده و پارامترهای اثرگذار سنجیده شوند [۱۶]. در بحث ساختارهای پایه، به‌طور کلی سه شیوه عمده حرکتی در مباحث جستجو و نظارت مداوم هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد: حرکت جاروبی رفت‌وبرگشتی (ماشین چمن‌زنی)، حرکت حلزونی (مارپیچی) و سایر حرکت‌های ترکیبی خطی یا منحنی.

در این مقاله، ضمن استفاده از یک تابع هیوریستیک مشخص که ارزش سلول‌ها را برای بازبینی تعیین خواهد نمود، ضرایب وزنی در نظر گرفته می‌شوند که این ضرایب می‌توانند با اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی سبب کمینه‌سازی زمان بازدید مجدد گردد. چون زمان عمر محدوده‌های بازدید‌شده در تکرارهای متعدد متفاوت بوده و همچنین اجرای نظارت روی گرما موجب زمان‌های بیشینه بازبینی متفاوتی برای هر محدوده می‌گردد؛ نقطه بحرانی مسئله، که الگوریتم بهینه‌سازی نیز باید روی آن متمرکز شود، بیشینه تمامی زمان‌های بازبینی حادث‌شده در تمامی گرما در تکرارهای متعدد است که این زمان باید کمینه گردد. راه‌کار استفاده از پیمایش‌های پایه گفته‌شده در نظارت مداوم صرفاً تولید معیاری برای سنجش کارایی ساختار بهینه‌سازی مورد نظر می‌باشد. با توجه به لزوم بهینه‌سازی عملکرد پروازی در پروازهای پایشی، تمرکز اصلی این مقاله بر استخراج مناسب تابع هیوریستیک یادشده بر مبنای کمینه‌نمودن مسافت پروازی در پروازهای چندعاملی با راه‌کاری برخط است. در واقع با این ساختار ضمن بهینه‌سازی ضرایب تابع هیوریستیک برای یک محدوده مشخص و با تعداد عامل‌های معین می‌توان به بیشترین کارایی در کمینه نمودن زمان‌های بازبینی محدوده‌های با اهمیت رسید. در بخش‌های آینده نخست مبانی نظارت مداوم و فرمول‌بندی این مسئله با توجه تجزیه محیط به نقاط با اهمیت بیان می‌شود و سپس ساختار بهینه‌سازی برای هر دو نوع پیمایش تجزیه نقاط و

فرض پیوستگی زمان یک مقدار بیشینه محلی را در این لحظه نشان خواهد داد؛ مجموعه توالی این نقاط بیشینه محلی تعیین‌کننده بیشینه سراسری خواهد بود. با توجه به تشریح ذکرشده در مرجع [۱۹] برای تعیین ساختار زمانی پیمایش شکل ۲ در واحد طول، دو رویکرد حرکت به چپ یا راست وجود خواهد داشت. در نتیجه این پیمایش و با آغاز حرکت به سمت هر یک از نواحی دو الگوی زمانی شکل ۳ به‌وجود می‌آید. با توجه به نقاط ماکزیمم مشاهده‌شده در هر رویکرد، جهتی دارای بیشترین کارایی است که دارای اندازه بیشینه زمان بازمینی کمتری در توالی بازمینی‌ها متعدد باشد. با توجه به این الگو می‌توان از شبه‌کد بیان‌شده در رابطه ۳ برای پیمایش استفاده نمود.

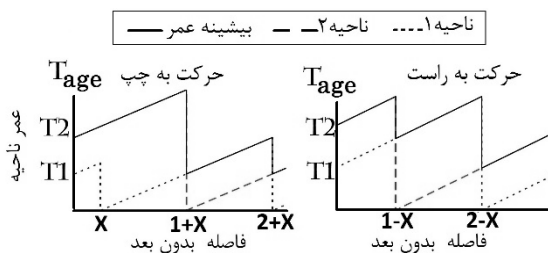


شکل ۱. پارامترهای دوربین پرنده



شکل ۲. شیوه پیمایش تک‌بعدی بین دو ناحیه پراهمیت

$$\begin{aligned}
 &\text{if } T_1 \leq \frac{X}{V_a} \Rightarrow \text{Right} \\
 &\text{if } T_2 \leq \frac{1-X}{V_a} \Rightarrow \text{Left} \\
 &\text{Else} \\
 &T_1 - \frac{X}{V_a} \geq T_2 - \frac{1-X}{V_a} \Rightarrow \text{Left}
 \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۳. الگوهای پیمایش بین دو ناحیه

است، براساس پارامترهای حسگر و شیوه حرکت در محیط است. حسگر مورد استفاده در این مقاله دوربین پایین‌نگر ثابت در زیر بدنه پهپاد است. پارامترهای دوربین در شکل ۱ نمایش داده شده و میدان دید (FOV) زمینی دوربین به‌صورت مستطیلی با طول  $l_c$  و عرض  $w_c$  در نظر گرفته می‌شود.

برای ساده‌سازی حرکت فرض می‌شود که سرعت زمینی وسیله و ارتفاع پروازی ثابت، دورزدن با تکنیک چرخش با غلتش (STT) و با یک زاویه غلت ثابت  $(\phi)$  و با شعاع ثابت  $R_{tum}$  انجام می‌شود. شعاع چرخش نیز در مقایسه با ابعاد تصویر زمینی دوربین و ابعاد پهنه جستجو مقداری غیر قابل اغماض فرض می‌شود. بنابراین حداقل شعاع چرخش با رابطه ۱ به سایر پارامترها مرتبط می‌شود [۱۷].

$$R_{tum} = \frac{mV_a^2}{L_a \sin \phi} \quad (1)$$

در این حالت و با این فرضیات، نرخ تغییر زاویه سمت پرنده  $(\dot{\chi})$  نیز از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۸].

$$\dot{\chi} = \frac{g \tan \phi}{V_a} \quad (2)$$

در این روابط  $L_a$  نیروی برای پهپاد،  $m$  جرم پرنده،  $V_a$  سرعت برآیند و  $g$  شتاب جاذبه است. هر نقطه یا محدوده مهم در این الگو دارای یک زمان بازمینی یا زمان عمر بوده که عبارت است از زمان سپری‌شده از آخرین بازمینی آن منطقه که با پارامتر  $(T_{age})$  ثبت می‌شود. بنابراین در نظارت و کنترل یک محدوده بیشینه مقدار  $T_{age}$  در واقع بحرانی‌ترین حالت مسئله است که باید این مقدار بیشینه کمینه شود. با شبیه‌سازی حالت‌های مختلف رابطه‌ای برای کمترین مقدار  $T_{age}$  بیشینه که با بررسی تمام محدوده‌های زمینی ثبت‌شده در یک پرورد زمانی نظارت به‌دست می‌آید، محاسبه می‌گردد. پارامترهای مهم در هر بخش زمان بازمینی و تعداد عامل‌هاست که وابستگی این دو پارامتر در هر مسئله بررسی می‌شود.

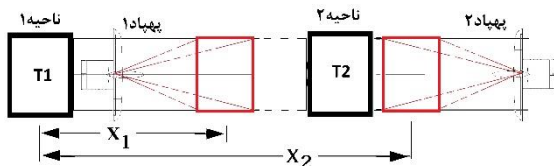
## ۲-۱. ساختار بهینه‌سازی زمان بازمینی

در هر ساختار پیمایشی و هر سیاست حل، زمان به‌عنوان یک کمیت افزایشی و دارای شیب مثبت تلقی می‌شود. پارامتر  $T_{age_i}(t)$  برای هر محدوده  $i$  بر سب مکان پرنده شیب انباشتگی زمان را تعیین خواهد نمود که تابعی از سرعت پرنده  $(V_a)$  است. با بازدید مجدد محدوده  $i$  اندازه این پارامتر صفر می‌شود، بنابراین با

می‌شود. برای پایش چندعاملی ابتدا فرمول‌بندی دو عامل در یک صفحه یک‌بعدی بیان می‌گردد.

### ۳-۱. پیمایش یک‌بعدی دو عامله

با توجه به شکل ۴، چنانچه پهپاد ۲ ناحیه ۲ را برای پیمایش انتخاب نماید، پهپاد ۱ ملزم به پیمایش یکی از جهت‌های چپ (ناحیه ۱) یا راست (ناحیه ۲) می‌باشد؛ از اینرو پیمایش با در نظر گرفتن زمان بازبینی عامل ۲، با رابطه ۶ بیان می‌شود.



شکل ۴. شیوه پیمایش یک‌بعدی بین دو ناحیه پراهیمت

$$\begin{aligned} & \text{if } \left( T_2 + \frac{X_2 - 1}{V_a} \leq T_1 + \frac{2 - X_1}{V_a} \right) \text{ or} \\ & \left( T_2 - \frac{1 - X_1}{V_a} + \frac{X_2 - 1}{V_a} \right) \leq \\ & \left( \left( T_1 - \frac{X_1}{V_a} + \frac{X_2}{V_a} \right) + \frac{X_1}{V_a} - \frac{X_2 - 1}{V_a} \right) \Rightarrow \text{Left} \end{aligned} \quad (6)$$

بخش اول رابطه ۶ بیانگر مقایسه زمان رفتن پهپاد ۱ به ناحیه ۲ و سپس ۱ با زمان رسیدن پهپاد ۲ به ناحیه ۲ است و بخش دوم این رابطه حالتی را نشان می‌دهد که پهپاد ۱ پیش از آنکه در موقعیت فعلی قرار گیرد در ناحیه ۲ بوده است. این وضعیت می‌تواند به تعداد نقاط بیشتری توسعه یابد. برای تک‌تک نواحی ز پراهیمت می‌توان رابطه تابع ارزش هیوریستیک را با توجه به زمان بازبینی و موقعیت قرارگیری دو عامل با رابطه ۷ محاسبه کرد.

$$V_j = \max \left\{ \left( T_{age_j} - \frac{d_{1j}}{V_a} - \frac{d_{2j}}{V_a} \right), 0 \right\} \quad (7)$$

با توجه به فرم تابع وزنی می‌توان به رابطه ۸ برای هیوریستیک بهینه‌سازی رسید.

$$V_j = \max \left\{ \left( T_{age_j} - w_1 d_{1j} - w_2 d_{2j} \right), 0 \right\} \quad (8)$$

### ۳-۲. بسط به حالت کلی دوبعدی چندعامله

حالت چندعامله دوبعدی حالت کلی مسئله مورد بحث در شیوه تعریف نواحی با اهمیت است. تابع هیوریستیک ارزش هر نقطه ز نسبت به هر عامل i یک تانسور  $V_{ij}$  خواهد بود که به فرم تانسوری به شیوه رابطه ۹ قابل تعریف است.

با نگرش به این الگوریتم در ساختار کلی پیمایش می‌توان ارزشی برای نقاط بر اساس زمان عمر ( $T_{age}$ ) و فاصله پهپاد تا آن نقطه در نظر گرفت که هرچه این ارزش بزرگتر باشد، اولویت نقطه برای بازدید مجدد بیشتر خواهد بود. این ارزش با رابطه ۴ برای تعداد نقطه نتیجه‌گیری می‌شود.

$$V_j = \max \left\{ \left( T_{age_j} - \frac{d_j}{V_a} \right), 0 \right\} \quad (4)$$

که در این رابطه  $d_j$  فاصله عامل تا گره زمی‌باشد. این ارزش در هر لحظه تصمیم‌گیری برای حرکت به سمت یکی از نقاط محدوده باید برای تمام نقاط موجود در منطقه پیمایش محاسبه شود و بیشترین ارزش جهت مسیر بعدی را تعیین می‌نماید. چون برای بهینه‌سازی یکی از پارامترهای تصمیم‌سازی باید تغییر یابد و از طرفی همیشه ضریب منبای  $-\frac{1}{V_a}$  برای فاصله و ارزش‌گذاری، ضریب بهینه نیست، این ضریب به‌عنوان مقدار اولیه تابع وزنی وارد محاسبات شده تا با تغییر تابع ارزش زمینه ایجاد زمان بازبینی کمینه فراهم آید. این فرایند به‌معنای تغییر سرعت پهپاد نیست، بلکه دستکاری تابع ارزش به‌گونه‌ای است که کمینه زمان بازبینی را با تکرارهای پیمایش فراهم آورد. رابطه ۴ برای فرایند بهینه‌سازی به‌شیوه رابطه ۵ بازنویسی می‌شود.

$$V_j = \max \left\{ \left( T_{age_j} - w_1 d_j \right), 0 \right\} \quad (5)$$

در واقع، این رابطه منبایی برای توسعه روش پیمایش به الگوهای چندعاملی و تابع هیوریستیکی برای سنجش ارزش گره‌ها برای کاربری در الگوریتم بهینه‌سازی است.

### ۳-۳. فرمول‌بندی نظارت مداوم چندعاملی با نواحی مشخص

مقدار مطلوب ضریب وزنی برای کمینه‌سازی بیشینه زمان بازبینی وابسته به مکان نقاط و نواحی مورد بازبینی و با تغییر مکان این نقاط مقادیر بهینه نیز تغییر می‌یابند. برای بسط الگوی پیمایش از رابطه ۵ در حالت کلی استفاده می‌شود. برای دستیابی به چگونگی بهینه‌سازی تک‌عاملی، یک صفحه دوبعدی با تعداد n نقطه در نظر گرفته می‌شود و برابر الگوریتم رابطه ۴ برای چند دور پیمایش تمامی نقاط بیشینه زمان ثبت می‌گردد. طبق مرجع [۲۰] زمان‌های مبتنی بر هیوریستیک حریمانه فاصله کارایی بهتری نسبت به سایر هیوریستیک‌های مطرح دیگر (از جمله جمع زمان بازبینی) خواهند داشت. در این شیوه فرمول‌بندی هیوریستیک رابطه ۵ به‌گونه مناسب برای الگوریتم بهینه‌سازی توسعه داده

$$V_{ij} = \max \left\{ \left( T_{age_j} - w_1 d_{ij} - \sum_{k=2}^m w_k \min_{k \neq i} d_{kj} \right), 0 \right\} \quad (9)$$

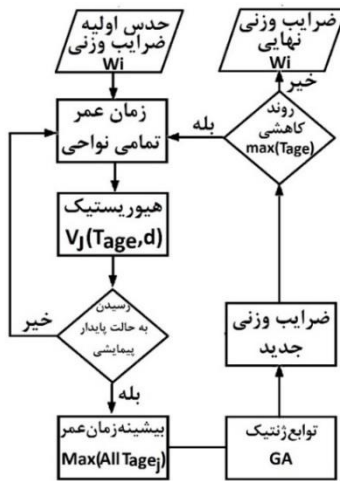
#### ۴. ساختار بهینه‌سازی

فرمول‌بندی بیان‌شده در حالت کلی ضرایب وزنی تابع ارزش را در مقدار  $\frac{1}{V_a}$  تنظیم می‌نماید که این به‌عنوان حدس اولیه مناسبی جهت فرایند بهینه‌سازی تلقی می‌شود. چون مکان نواحی پراهمیت و مکان فعلی عامل‌ها و تعداد عامل‌ها در تغییر ضرایب وزنی برای کمینه‌سازی بیشینه زمان بازیابی حادث‌شده هر ناحیه مؤثر است، فرایند بهینه‌سازی اهمیت می‌یابد. به‌عبارتی برای هر نواحی پراهمیت ثابت ضرایب مشخصی تعیین می‌شوند که با تغییر این مکان‌بندی، ضرایب وزنی نیز باید تغییر یابند. تابع هزینه تعریف‌شده برای بهینه‌سازی، بیشینه زمان بازیابی تمامی سلول‌ها در تکرارهای زیاد است. چون معمولاً با ضرایب مشخص وزنی پیمایش بعد از چند تکرار (حداقل سه برابر تعداد سلول‌ها) به حالت پایداری خواهد رسید، بیشینه زمان بازیابی تمامی سلول‌ها، در این تعداد تکرار مشخص مد نظر قرار خواهد گرفت و نیازی به تکرارهای بیشتر نمی‌باشد. مرجع [۲۱] برای بهینه‌سازی حل تکراری ISIS را پیشنهاد کرده است. اما به‌دلیل زمان‌بر بودن این روش‌ها و افزایش کارایی تکرار، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک با انتخاب‌های تصادفی در میان جواب‌های ممکن استفاده می‌شود. درجه پیچیدگی، صرف حافظه و زمان‌بر بودن این روش از سایر الگوریتم‌های تکراری کمتر است [۲۲]. شکل ۵ روندنمای بهینه‌سازی و اثر الگوریتم ژنتیک بر ساختار بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

#### ۵. فرمول‌بندی زمان کمینه در محدوده‌های پیوسته

در شیوه پیمایش پیوسته، که در این مقاله به‌عنوان معیار مرجع قلمداد می‌شود، محدوده به نواحی پراهمیت تقسیم‌بندی نمی‌شود و هر نقطه محدوده و هر فریم ثبت‌شده توسط دوربین به‌عنوان یک ناحیه مهم تلقی می‌شود. در واقع پهنه مورد جستجو مجموعه‌ای پیوسته از نواحی با ارزش بازیابی یکسان در نظر گرفته می‌شود که باید پیمایش شود. با شبیه‌سازی حالت‌های مختلف رابطه‌ای برای کمترین مقدار  $T_{age}$  بیشینه که با بررسی تمام محدوده‌های زمینی ثبت‌شده در یک پرپود زمانی نظارت به‌دست می‌آید، محاسبه می‌گردد. پارامترهای مهم در هر بخش

زمان بازیابی و تعداد عامل‌هاست که وابستگی این دو پارامتر در هر مسئله بررسی می‌شود. شیوه بررسی زمان بازیابی براساس گشت‌زنی‌های پایه ماشین چمن‌زنی<sup>۶</sup> و حلزونی<sup>۷</sup> بوده و محیط مورد پیمایش یک محیط منظم همگون و همبند خطی (در مسائل یک‌بعدی) و مستطیلی (در مسائل دوبعدی) می‌باشد.



شکل ۵. روندنمای بهینه‌سازی ضرایب و کمینه‌سازی بیشینه زمان

#### ۵-۱. ساختار پیمایشی ماشین چمن‌زنی

در پیمایش ماشین چمن‌زنی، حرکت از یک نقطه آغاز شده و محدوده به‌صورت رفت‌وبرگشت پیمایش می‌شود. برای ربات‌های زمینی و همچنین سامانه‌های هوایی حرکتی دارای بیشترین کارایی است که علاوه بر کاهش زمان جستجو، کمترین تلاش کنترلی (کمترین دورزدن‌ها یا تغییرمسیرهای ممکن) را در پی داشته باشد. در حالت چندعاملی، محدوده جستجو بین تعداد مشخصی از عامل‌ها تقسیم شده و زمان بازیابی در این حالت نیز محاسبه می‌شود. برای دورزدن و تغییر مسیر از حالت بیرون از محدوده استفاده می‌شود؛ در واقع فرض می‌شود که پرندۀ مسیر مورد نظر را تا انتها ادامه داده و در خارج از مسیر اقدام به دور زدن و برگشت به ادامه مسیر جستجو می‌نماید. فرض کلی تمامی مباحث جستجو در این فصل، ثابت‌بودن سرعت وسیله پرنده و عدم افت ارتفاع در نتیجه دورزدن‌های پیمایشی است. در ادامه روابط این نوع جستجو برای پهپادهای بال ثابت با افزایش بعد منطقه مأموریت بیان می‌گردد.

#### ۵-۱-۱. نظارت مداوم محدوده یک‌بعدی

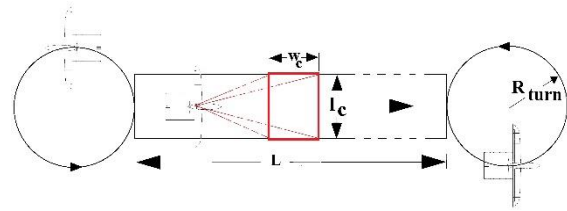
این نوع نظارت برای پیمایش‌های مرزی یا ساحلی کاربرد دارد. در این حالت عامل‌های پرنده در محدوده جستجو به‌صورت خطی و

در مورد محدودیت تعداد، با توجه به لزوم استفاده از عدد صحیح برای تعداد فروندهای پروازی، شرط عدم همپوشانی الزاماً یک فروند کمتر مساوی شرط پوشش کامل محدوده است. با توجه به این، در رابطه ۱۲ از شرط پوشش کامل و در رابطه ۱۳ از شرط جلوگیری از همپوشانی استفاده شده است. گفتنی است تعداد کمینه و بیشینه محاسبه شده مربوط به حالت‌های بهینه بوده و مرتبط با عموم شیوه‌های پیمایشی نمی‌باشد.

### ۵-۱-۲. نظارت مداوم سطح دوبعدی

در صورت مهم‌بودن تمام نقاط محدوده و پیوسته‌بودن نواحی مورد جستجو، این شیوه می‌تواند به سه صورت: موازی با طول، موازی با عرض و اریب انجام پذیرد. با فرض منظم‌بودن، پیوسته و همواربودن مرزها، برای استخراج روابط پایه اگر محدوده جستجو مستطیل شکل با طول  $(L)$  و عرض  $(W)$  باشد  $(L \geq W)$ ، آنگاه جستجوهای موازی با طول دارای تلاش کترلی کمتر هستند و از اینرو دارای کارایی بهتری در سامانه‌های هوایی هستند. برای انجام این جستجو پس از اتمام پیمایش یک محدوده، پرنده می‌تواند به صورت محیطی یا قطری به مکان اولیه جستجو برگشته و گشتزنی را برای مرحله بعد، از سر گیرد. شکل ۷ شیوه جستجوی تک‌عاملی را برای یک محدوده مشخص در حالت موازی با طول نشان می‌دهد که براساس پارامترهای دوربین و شرایط قابل ملاحظه بودن شعاع چرخش در مقابل عرض میدان دید زمینی، اقدام به پیمایش می‌نماید. در واقع در این نوع پیمایش یک پهپاد به صورت رفت‌وبرگشت اقدام به جستجوی محدوده نموده و برای جلوگیری از همپوشانی محدوده‌های جستجو، نیاز است که عرض محدوده پیمایش شده برابر با طول میدان دید دوربین باشد. شکل ۷ لحظه‌های متفاوتی از جستجوی این پهپاد را در عرض‌های مختلف محدوده در قالب یک تصویر نشان داده‌است. برای کاهش فاصله پیمایش؛ یعنی برگشت به نقطه اول فرض می‌شود که عرض محدوده جستجو مضرب زوجی از طول میدان دید دوربین باشد؛ یعنی به عبارتی  $(W = 2k l_c)$  است که  $k$  می‌تواند هر عدد صحیح مثبتی باشد. برای حالتی که طول میدان دید تقریباً با قطر کمینه دوزدن هواپیما برابر باشد  $(l_c \approx 2R_{turn})$ ، زمان بازبینی یک نقطه در پیمایش به موازات طول از رابطه ۱۴ محاسبه می‌گردد.

رفت‌وبرگشتی اقدام به گشتزنی و جستجو می‌نمایند. شکل ۶ این ساختار را با طول مسیر  $(L)$ ، طول میدان دید زمینی دوربین  $l_c$  و عرض  $w_c$  نشان داده است.



شکل ۶. نظارت یک‌بعدی روی خط

با فرض قابل‌توجه بودن شعاع چرخش در بیرون از مسیر نسبت به سایر ابعاد مؤثر، کمینه بیشترین مقدار زمان بازبینی در حالت تک‌عاملی و چندعاملی با تعداد  $N_{agent}$  عامل با روابط ۱۰ و ۱۱ بیان می‌گردند. در واقع با هر شیوه‌ای که پیمایش انجام شود این زمان کمترین زمان ممکن قابل دستیابی و حد پایین مسئله است.

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{V_a} \quad (10)$$

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{N_{agent} V_a} \quad (11)$$

زمان کمینه بازبینی بیشینه برای تمام فریم‌های  $i$  تصاویر ثبت‌شده در حالت تک‌عاملی با توجه به شعاع چرخش کمینه و سرعت پروازی به دست می‌آید. در حالت چندعاملی، مقدار کمینه زمان بازبینی برای حالتی تعیین می‌گردد که کلیه پهپادها در همان مسیر مشخص شده با فواصل مساوی به دنبال هم اقدام به انجام پیمایش نمایند یا فواصل به‌گونه منطقی برای عملیات جاروب رفت‌وبرگشتی میان عامل‌ها تقسیم شده باشد که در حالت پرنده‌های همگن و شرایط پروازی یکسان این فواصل مساوی محاسبه می‌شوند. با توجه به مشخصات ابعاد زمینی دوربین، حداکثر تعداد پهپادها  $(N_{agent})$  برای پوشش کامل نواحی مورد بازدید محدود بوده و این محدودیت با رابطه ۱۲ قابل بیان است.

$$N_{agent,max} = \left\lceil \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{w_c} \right\rceil + 1 \quad (12)$$

در این رابطه عبارت [ ] بیانگر جزء صحیح است. اگر زمان بازبینی یک عدد مشخص  $T_{revisit} = t$  تعیین گردد، حداقل تعداد پهپاد مورد نیاز برای بازبینی محدوده و با محدودیت جلوگیری از همپوشانی پهپادها عبارت است از:

$$N_{agent,min} = \left\lceil \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{t V_a} \right\rceil \quad (13)$$



فرض مهم نبودن شعاع چرخش در مقایسه با طول زمینی میدان دید با روابط ادامه بیان می‌گردد.

$$N_{agent_{max}} = \left[ \frac{2kL + 2W}{w_c} \right] + 1 \quad (18)$$

$$N_{agent_{min}} = \left[ \frac{2kL + 2W}{t V_a} \right] \quad (19)$$

### ۵-۲. ساختار پیمایشی نظارت مداوم به شیوه حلزونی

پیمایش حلزونی از مرکز یک محدوده که می‌تواند یک باند پروازی باشد آغاز و به صورت مارپیچی کل محدوده را پوشش می‌دهد و سپس به نقطه اولیه برای از سرگیری فرایند جستجو تکرار بازیابی، برخواهد گشت. برای بررسی حالت بحرانی و مقایسه عملکردی با حالت چمن‌زنی، از محدوده‌ای مربع شکل که اضلاع محدوده مضرب فردی از طول زمینی میدان دید دوربین است استفاده می‌شود ( $L = W = (2k + 1)l_c$ ). طول مسیر طی شده از یکی از رئوس مربع تا رسیدن به مرکز آن در روش حلزونی از رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Length of path} = & 2kl_c + 2(2k)l_c \\ & + 2(2k - 1)l_c \\ & + 2(2k - 2)l_c + \dots + 2(2l_c) \\ & + 2l_c = \frac{L^2 - l_c^2}{l_c} \end{aligned} \quad (20)$$

با توجه به طول مسیر طی شده، زمان بازیابی مجدد نقاط برای جستجوی حلزونی شکل عبارت است از:

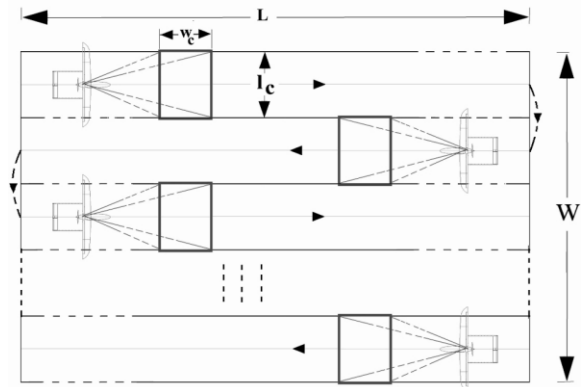
$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{\frac{L^2 - l_c^2}{l_c} + \frac{\sqrt{2}}{2}L}{V_a} \quad (21)$$

زمان بازیابی شیوه چمن‌زنی نیز با رابطه ۲۲ برابر است و تنها تفاوت در بازگشت به نقطه اولیه. در حالتی که محدوده مستطیل شکل باشد و طول و عرض مضرب زوجی از طول میدان دید دوربین باشند؛ طول جستجو به روش حلزونی شکل عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Length of path} = & (2k - 1)l_c \\ & + 2(k + k - 1)l_c \\ & + 2(k + k - 2)l_c + \dots \\ & + 2(k + k - (2k - 1))l_c \\ = & (L - l_c) \\ & + \frac{(W - l_c)(L + 2W)}{l_c} \end{aligned} \quad (22)$$

در نتیجه کمینه زمان بازیابی با رابطه ۲۳ بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} \min(\max(T_{revisit_i})) \\ = \frac{\left( (L - l_c) + \frac{(W - l_c)(L + 2W)}{l_c} \right) + \frac{L^2 + W^2}{2}}{V_a} \end{aligned} \quad (23)$$



شکل ۷. نظارت دو بعدی رفت و برگشتی به شیوه چمن‌زنی یک عامله

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + (2k - 1)\frac{\pi l_c}{2} + W}{V_a} \quad (14)$$

برای حالتی که طول میدان دید بسیار بزرگتر از قطر کمینه دورزنی پهباد باشد ( $l_c \gg 2R_{turn}$ ), رابطه ۱۴ به رابطه ۱۵ تبدیل می‌شود.

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + 2W}{V_a} \quad (15)$$

همان‌گونه که از روابط ۱۴ و ۱۵ مشخص است، علاوه بر هندسه محدوده جستجو، پارامتر مهمی که بر زمان بازیابی نقاط تأثیرگذار است سرعت حرکت پهباد به گونه‌ای است که با افزایش سرعت وسیله، زمان بازیابی نقاط محدوده کاهش می‌یابد. برای حالت چندعاملی همگن در صورتی که مشخصات سرعت، ارتفاع پروازی، سوخت مصرفی، الگوی عوارض سطحی محدوده مورد نظارت، شعاع دورزنی و ابعاد تصویر دوربین و مسائل مشابه باشد بهترین حالت تقسیم مساوی طول جستجو به تعداد عامل‌های پروازی است. با تغییر هر یک از پارامترهای بالا، محدوده منطبق شده برای هر عامل و کمینه بیشترین زمان بازیابی دچار تغییراتی خواهد شد. با پهبادهای مشابه و پارامترهای پروازی یکسان، کمینه بیشترین زمان بازیابی با فرض قابل ملاحظه بودن قطر کمینه دورزنی با رابطه ۱۶ و قابل ملاحظه نبودن آن با رابطه ۱۷ به دست خواهد آمد.

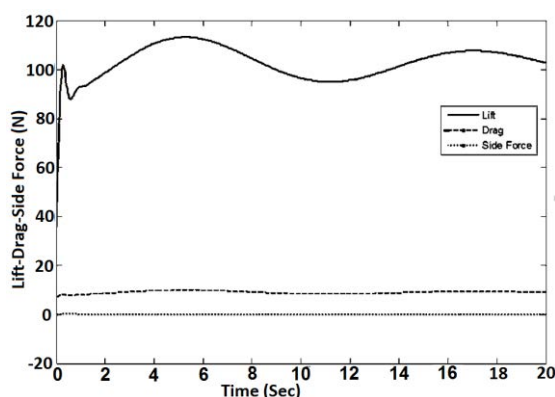
$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + (2k - 1)\frac{\pi l_c}{2} + W}{N_{agent} V_a} \quad (16)$$

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + 2W}{N_{agent} V_a} \quad (17)$$

حداکثر تعداد عامل‌ها و تعداد پهبادها برای زمان بازیابی مشخص t نیز برای پوشش کامل و عدم هم‌پوشانی نواحی، با



مناسب استاتیکی نیز برخوردار است. برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف کنترلی آرایش پرواز و هدایت در طرح‌ریزی مانورها از مدل شش درجه آزادی غیرخطی این پرنده در یک ساختار کنترلی پرواز هم‌سطح حالت پایدار<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. مرجع [۲۳] مدل کامل غیرخطی از این پرنده با در نظر گرفتن شرایط محیطی و باد، مدل کامل موتور، اتمسفر و زمین و لحاظ کلیه عدم قطعیت‌های محیطی و پارامتری ارائه نموده است. برای محاسبه نیروی برآ و سایر پارامترهای موردنیاز در شبیه‌سازی، پرواز این پرنده در شرایط ارتفاع ۱۰۰۰ متری با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه، در حضور آثار اتمسفر، نویز، عدم قطعیت‌ها و سایر شرایطی که در این مدل ارائه شده، کنترل می‌گردد. نیروی برآ در این شرایط و طبق شکل ۸ در حدود ۱۰۰ نیوتن به‌دست خواهد آمد.



شکل ۸ نیروی برآ، پسا و جانبی در پرواز سطحی پایدار پهپاد Aerosond

کمینه شعاع دورزنی طبق رابطه ۱ ۵۰۰ متر و ابعاد زمینی تصویر ۳۰۰ در ۴۰۰ متر با نسبت سه‌چهارم محاسبه می‌شود. برای نتایج شبیه‌سازی، نظارت مداوم محدوده‌های یک‌بعدی و دوبعدی با ۱ و ۲ عامل مورد تمرکز قرار می‌گیرد. برای سنجش بهینه‌سازی ابتدا محدوده مورد نظر شامل نواحی پراهمیت با ضرایب وزنی  $\frac{1}{V_a}$  اجرا می‌شود و پس از رسیدن به پیمایش پایدار در چندتکرار مشخص نتایج به‌دست آمده با نتایج ضرایب بهینه‌شده مقایسه می‌گردد. سپس در ادامه کارایی زمان بازبینی بهینه‌شده با معیارهای مرجع محاسبه‌شده در بخش ۴ مقایسه می‌گردد. پهنه مورد نظارت برای مسائل یک‌بعدی ۱۰۰ کیلومتر و برای مسائل دوبعدی ۱۰۰ کیلومتر در ۶۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود.

#### ۶-۱. بازبینی محدوده‌های یک‌بعدی

در این شیوه محدوده مورد بازدید به‌مانند پیمایش‌های مرزی روی

برای حالت چندعاملی با توجه به مشخص شدن طول پیمایش می‌توان شیوه‌های مأموریت متفاوتی انتخاب کرد. کمینه بیشترین زمان بازبینی این شیوه پیمایش در حالت چندعاملی به‌گونه‌ای تقسیم نواحی و یا تقسیم عامل‌ها در یک مسیر در حالت حدی به مقدار رابطه ۲۴ میل می‌نماید.

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{\left( (L - l_c) + \frac{(W - l_c)(L + 2W)}{l_c} \right) + \frac{L^2 + W^2}{2}}{N_{agent} V_a} \quad (24)$$

محدودیت تعداد عامل‌ها هم برای عدم همپوشانی تصاویر دوربین نیز با رابطه ۲۵ بیان می‌گردد.

$$n_{in} = \frac{\left( (L - l_c) + \frac{(W - l_c)(L + 2W)}{l_c} \right) + \frac{L^2 + W^2}{2}}{w_c} \quad (25)$$

جستجوی حلزونی دارای عملکردی مشابه جستجوی چمن‌زنی در زمان پوشش کل محدوده در یک مرحله است، اما در هنگام بازگشت به نقطه اولیه به‌ویژه برای نواحی خطی و دارای نسبت طول به عرض بالا ( $\frac{L}{W} \gg 1$ )، معمولاً مسیر بیشتر و زمان بیشتری مورد نیاز است ضمن اینکه این نوع جستجو در سامانه‌های هوایی نیازمند تأثیرگذاری زیاد و دائم سطوح کنترلی، تلاش کنترلی بیشتر و ایجاد گردش پایدار در کل مسیر است. در نتیجه این نوع حرکت به‌ویژه در نواحی مرکزی و با کوچک شدن مداوم سطح مورد جستجو، موجب اشباع سطوح کنترلی، از دست‌رفتن ارتفاع در حالت گردش با گلتش و کنترل دشوار در این نواحی است، حال آنکه جستجوی ماشین چمن‌زنی دارای این قیود نبوده و برای سامانه‌های هوایی کارا تر است.

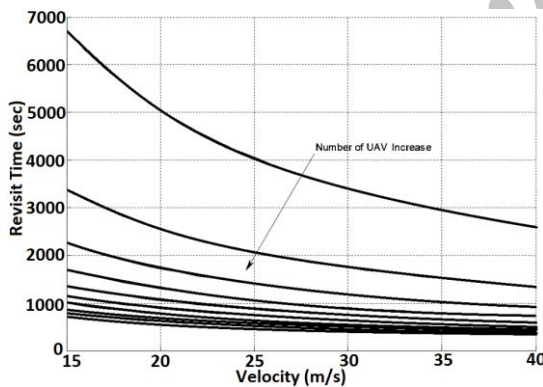
#### ۶. شبیه‌سازی و ارائه نتایج

پیمایش محدوده‌ای؛ مبتنی بر پارامترهای عملکردی پهپاد انتخابی است و استخراج زمان‌های کمینه با توجه به شیوه حرکتی پهپاد و مانورپذیری آن تعیین می‌شود. اگرچه کلیه این فرایندها در فاز کروز که تأثیرپذیری پارامتری کمتری دارد انجام می‌شود، اما انجام فرایندهای کنترلی برای قرارگرفتن پهپاد در موقعیت طراحی مأموریت اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله برای شبیه‌سازی از مدل شش درجه آزادی پهپاد Aerosonde با مأموریت هواشناسی، جغرافیا و تغییرات جوی استفاده می‌شود. این هواپیما دارای موتور ملخی پیستونی، دم ۷ وارون<sup>۸</sup> و بال بالا<sup>۹</sup> می‌باشد و از پایداری

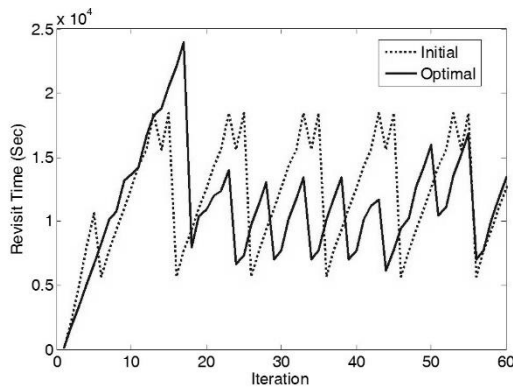
وابسته به موقعیت نقاط می‌باشد که آزمون مونت کارلو در واقع مقادیر متوسط مناسب را در اختیار قرار می‌دهد. شکل ۹ حاصل شبیه‌سازی اولیه پیمایش تا رسیدن به حالت پایدار برای یکی از نقاط محدوده را نشان می‌دهد که در حالت بهینه‌سازی ضریب وزنی، زمان بازبینی به‌گونه قابل ملاحظه‌ای کمتر شده است. کمینه بیشینه‌های زمان بازبینی در شکل ۹ با داده‌های به‌دست آمده در شکل ۱۰ برای ۱ عامل که از روابط پیمایش مرجع خطی استخراج شده، قابل مقایسه است.

### ۶-۲. بازبینی محدوده‌های دوبعدی چندعامله

در حالت دوبعدی، در محدوده ۱۰۰ کیلومتر در ۶۰ کیلومتری مورد نظر ابتدا تعداد ۵ نقطه و سپس ۱۰ نقطه با اهمیت به‌صورت تصادفی برای سنجش کیفیت الگوریتمها انتخاب می‌شود و سپس ضرایب وزنی و زمان بازبینی کمینه برای پیمایش دو پهپاد محاسبه می‌شود. شکل ۱۱ برای تعداد ۵ نقطه توسط ۲ پهپاد در دو حالت پیمایش پایه و پیمایش بهینه‌شده وضعیت زمان بازبینی را در یکی از نقاط نشان می‌دهد و شکل ۱۲ نیز برای ۱۰ نقطه این شیوه پیمایش را لحاظ نموده است.

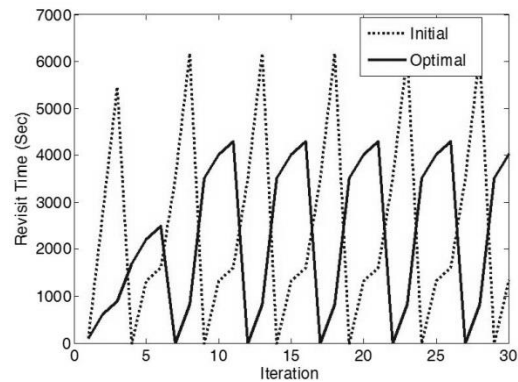


شکل ۱۰. زمان بازبینی نظارت یک‌بعدی بر اساس سرعت، از ۱ تا ۱۰ فروند

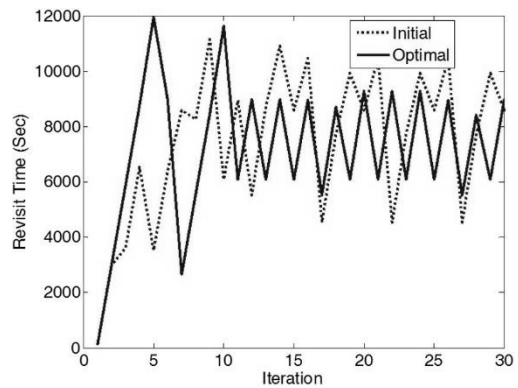


شکل ۱۲. نظارت دوبعدی با ۲ عامل و ۱۰ ناحیه پراهمیت

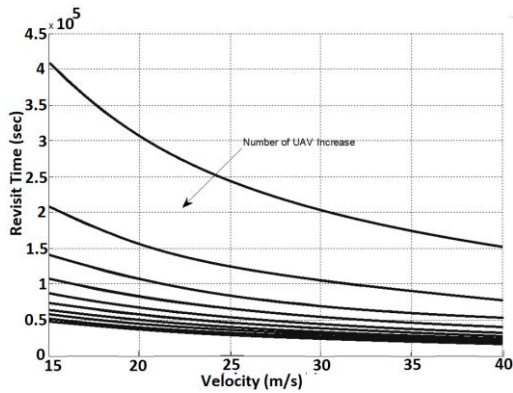
یک خط قرار دارد که برای سنجش کارایی بهینه‌سازی ابتدا ۱ عامل با ۲ ناحیه و سپس ۵ ناحیه پراهمیت خطی شبیه‌سازی می‌شوند و سپس کارایی بهینه‌سازی ۲ عامل و ۵ ناحیه پراهمیت محاسبه می‌شود. در یک خط ۱۰۰ کیلومتری و با نقاط با اهمیت ابتدا و انتهای مسیر تک ضریب وزنی بهینه همان مقادیر اولیه  $\frac{1}{V_a} = 0.033$  به‌دست آمده و کمترین زمان بازبینی بهینه نیز ۶۷۷۰ ثانیه حدود ۱/۸۸ ساعت به‌دست خواهد آمد. برای حالت ۱ عامل و ۵ نقطه با اهمیت که به‌صورت تصادفی در محدوده صفر تا ۱۰۰ کیلومتر انتخاب می‌گردند ضریب وزنی بهینه با توجه به موقعیت نقاط ۰/۰۰۹ و مقدار بیشینه زمان بازبینی کمینه البته برای هر یک از نقاط ۴۰۲۷ ثانیه به‌دست خواهد آمد که این مقادیر وابسته به موقعیت نقاط بوده و با تغییر آنها تغییر خواهند کرد. از اینرو با الگوریتم مونت کارلو و به‌سبب کاهش وابستگی سیستم به مقدار تصادفی موقعیت نقاط، پس از ۱۰۰ بار اجرای متوالی مقدار متوسط زمان‌های بازبینی ۳۹۵۰ و انحراف معیار ۲۲۳ و ضریب وزنی متوسط حدود ۰/۰۱ با انحراف معیار ۰/۰۰۰۸۵ به‌دست خواهند آمد. گفتنی است که برای هر وضعیت خاص نقاط چه در پیمایش خطی و چه در پیمایش صفحه‌ای مقادیر بهینه



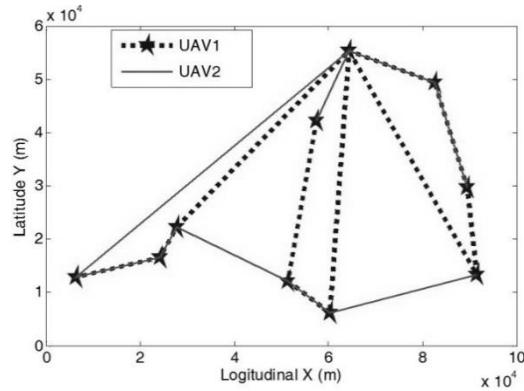
شکل ۹. نظارت یک‌بعدی با ۱ عامل و ۵ ناحیه پراهمیت



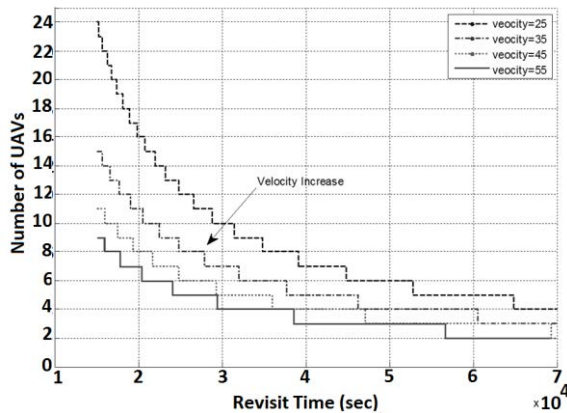
شکل ۱۱. نظارت دو بعدی با ۲ عامل و ۵ ناحیه پراهمیت



شکل ۱۴. زمان بازبینی نظارت دوبعدی بر اساس سرعت، از ۱ تا ۱۰ فروند



شکل ۱۳. چگونگی پیمایش نواحی پراهمیت توسط دو پهپاد



شکل ۱۵. نظارت دوبعدی: تعداد پهپادها با زمان بازبینی و اثر سرعت

یافت. عملکرد جستجو نیز با افزایش تعداد پهپادها تا حدی افزایش می‌یابد، اما برای این ناحیه استفاده از بیش از ۴ عامل پروازی اثر افزایش سرعت را تقریباً خنثی خواهد کرد و شیب زمان بازبینی نسبت به تغییرات سرعت تقریباً نزدیک به صفر خواهد شد.

## ۷. نتیجه‌گیری

قید زمان بازبینی یک محدوده وجه تمایز مسایل نظارت مداوم با دیگر مسائل نظیر جستجو یا پوشش‌دهی می‌باشد. اثر افزایش سرعت یا تعداد عامل‌ها در کاهش زمان بازبینی در یک محدوده مشخص مقرون‌به‌صرفه بوده و افزایش بی‌رویه این پارامتر ضمن پیچیده‌تر کردن مسئله کمکی به کاهش پایدار زمان بازبینی نخواهد کرد. از طرفی مشخص است که با افزایش زمان بازبینی یک نقطه به‌عنوان یک پارامتر پیش‌فرض یا افزایش سرعت وسیله تعداد عامل‌های مورد نیاز برای جستجوی یک محدوده مشخص کاهش می‌یابد. الگوهای پیمایشی مبتنی بر کمترین تلاش کنترلی برای مأموریت‌های هوایی مناسب‌تر از سایر الگوهاست که این مهم وجه تمایز الگوهای رفت‌وبرگشتی با سایر شیوه‌های حرکتی

شکل ۱۳ چگونگی پیمایش و مسیرهای پیموده شده در پهنه‌مسطحی مورد نظر، در بازه‌ای از زمان بازبینی بهینه به‌دست‌آمده توسط دو پهپاد را نشان می‌دهد. در این شکل ستاره‌ها نواحی پراهمیت تعریف شده می‌باشند. با توجه به زمان‌های بازبینی به‌دست‌آمده معیار پیمایش دوبعدی با شیوه‌های پایه نیز نتایج شکل‌های ۱۴ و ۱۵ را به تصویر می‌کشد. این نتایج حالت مرجع پیمایش دو بعدی (به‌دست‌آمده از رابطه ۲۱) را نشان می‌دهد و بیانگر حداقل زمان بازبینی قابل دستیابی در پیمایش دوبعدی و تعداد پهپادهای مربوطه است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند که در سرعت‌های بالا، اثر افزایش تعداد پهپادها بر کاهش زمان بازبینی، اثری محدود است و همچنین در تعداد عامل‌های بالا نیز تأثیر افزایش سرعت بر کاهش زمان بازبینی، مناسب نبوده و می‌توان با استفاده از این نتایج به حالت بهینه سرعت و تعداد برای یک پهنه مشخص رسید. بر این اساس رفتار جستجوی دوبعدی و یا به‌عبارتی جستجوی صفحه‌ای همانند جستجوی خطی یا تک‌بعدی بوده با این تفاوت که با گستردگی ناحیه، زمان بازبینی به نسبت جستجوی خطی افزایش خواهد

بسیار بیشتر شده و بعضاً برای دستیابی به پاسخهای مطلوب نیاز به حلقه‌های تکرار بیشتر و صرف زمان زیادتری است. یکی از شیوه‌های دیگر حل این مسئله تقسیم‌بندی محدوده جستجو به نواحی مجزا به اندازه تعداد پهپادهاست به گونه‌ای که هر محدوده به یک پهپاد اختصاص یافته و از تداخل محدوده‌ها جلوگیری نماید. در واقع مزایای این شیوه بسیار شفاف بوده و موجب کاهش پیچیدگی حل می‌گردد، ولی چون توابع ارزش هر نقطه قرار گرفته در محدوده‌ها یکسان نبوده و بعضاً در شرایط حل مسئله تغییر می‌یابند نیازمند صرف مجدد زمان برای تقسیم‌بندی دوباره ناحیه است که گاهی می‌تواند سبب تکرار چندباره این تقسیم‌بندی شود. همچنین شیوه اختلاط و درهم بودن عامل‌ها این مزیت را دارد که ممکن است یک نقطه که در شرایط بحرانی بازبینی قرار گرفته باشد توسط عامل همسایه در محدوده‌های جانبی امکان بازدید بهتری از پهپاد آن ناحیه داشته باشد، از اینرو شیوه‌های اختلاطی نیز دارای مزایای مشخص مربوط به خود است.

است. در جستجوهای چندعاملی با پهپادهای یکسان و شرایط پروازی برابر بهترین حالت پوشش‌دهی چندعامله تقسیم طول مؤثر پیمایش به تعداد عامل‌هاست. حالت بحرانی زمان بازبینی در نقاطی با بیشترین طول عمر یا زمان بازبینی ایجاد می‌شود که مهم‌ترین هدف الگوریتم‌های نظارت مداوم کمینه‌سازی زمان بازبینی بیشینه در طول مؤثر پیمایش است. شیوه‌های بیان شده در این مقاله برای یک وسیله مشخص و در یک پهپاد مشخص، کمینه بیشترین زمان بازبینی را با به‌کار بردن تعدادی پهپاد، ارائه خواهند داد که از آنها می‌توان در مسائل گشت‌زنی مرزی، نظارت جاده‌ای، نجات ساحلی و جز این‌ها استفاده کرد. مسئله کمترین زمان بازبینی می‌تواند با تبدیل آن به یک تابع هیوربستیکی و براساس ضرایب وزنی مشخص فرموله شود و بهینه‌سازی این ضرایب می‌تواند مسئله کمینه‌سازی بیشترین زمان بین حادث شده را حل نماید. از طرفی به‌دلیل ماهیت هیوربستیکی مسئله و حل ژنتیک با افزایش تعداد عامل‌ها پیچیدگی محاسباتی مسئله

#### ۸. مآخذ

- [1] American Institute of Aeronautics and Astronautics, Worldwide UAV Roundup, <http://www.aiaa.org/images/PDF/WilsonChart.pdf>, (accessed 6 January 6, 2018).
- [2] R. M. Murray, Recent research in cooperative control of multivehicle systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 129, no. 5, 2007, pp. 571-83.
- [3] H. Choset, Coverage for robotics-A survey of recent results, *Annals of mathematics and artificial intelligence*, vol. 31, no. 4, 2001, pp. 113-26.
- [4] N. Nigam, S. Bieniawski, I. Kroo, J. Vian, Control of multiple UAVs for persistent surveillance: algorithm and flight test results, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 5, 2012, pp. 236-51.
- [5] A. Xu, C. Viriyasuthee, I. Rekleitis, Optimal complete terrain coverage using an unmanned aerial vehicle, In Robotics and Automation (ICRA), *2011 IEEE International Conference*, 2011 May 9, pp. 2513-2519.
- [6] M. Flint, M. Polycarpou, E. Fernandez-Gaucherand, Cooperative path-planning for autonomous vehicles using dynamic programming, In Proceedings of the IFAC 15<sup>th</sup> Triennial World Congress, 2002 Jul 21, pp. 1694-1699.
- [7] K. M. Krishna, H. Hexmoor, S. Pasupuleti, J. Llinas, Parametric control of multiple unmanned air vehicles over an unknown hostile territory, *In Proceedings of the International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems*, Waltham, MA, USA, 2005 Apr 18, pp. 18-21.
- [8] D. Asadi, S. A. Bagherzadeh, Nonlinear adaptive sliding mode tracking control of an airplane with wing damage, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2017 Feb 2.
- [9] H. V. Parunak, Making swarming happen, *In Proceedings of Swarming and Network-Enabled C4ISR*, 2003 Jan.
- [10] D. A. Lawrence, R. E. Donahue, K. Mohseni, R. Han, Information energy for sensor-reactive UAV flock control, *In AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit*, 2004, pp. 1-14.
- [11] J. Keller, D. Thakur, M. Likhachev, J. Gallier, V. Kumar, Coordinated path planning for fixed-

- wing UAS conducting persistent surveillance missions, *In 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2015 Oct 18, pp. 1-6.
- [12] B. Bethke, J. P. How, J. Vian, Group health management of UAV teams with applications to persistent surveillance, *In 2008 American Control Conference*, 2008 Jun 11, pp. 3145-3150.
- [13] N. K. Ure, G. Chowdhary, T. Toksoz, J. P. How, M. A. Vavrina, J. Vian, An automated battery management system to enable persistent missions with multiple aerial vehicles, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, 2015, pp. 275-86.
- [14] N. Nigam, I. Kroo, Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles, *In Aerospace Conference*, IEEE, 2008 Mar 1, pp. 1-14.
- [15] M. A. Khesali, S. M. Dehghan, S. H. Cheheltani, A new spatiotemporal virtual plane to evaluate the performance of the border coverage scenarios. In *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference*, 2014, pp. 191-196.
- [16] H. Khandani, H. Moradi, J. Y. Panah, A real-time coverage and tracking algorithm for UAVs based on potential field. In *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference*, 2014, pp. 700-705.
- [17] J. D. Anderson, *Aircraft performance and design*, Boston: McGraw-Hill, 1999.
- [18] D. McLean, *Automatic flight control systems*, Prentice Hall, 1990.
- [19] N. Nigam, The Multiple Unmanned Air Vehicle Persistent Surveillance Problem: A Review, *Journal of Machines*, vol. 2, no. 1, 2014, pp. 13-72.
- [20] M. Flint, Fernandez-Gaucherand E, Polycarpou M., Cooperative control for UAV's searching risky environments for targets, In *Decision and Control, 2003, Proceedings. 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on 2003*, vol. 4, pp. 3567-3572.
- [21] D. Rajnarayan, I. Kroo, D. H. Wolpert, Probability collectives for optimization of computer simulations, In *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2007.
- [22] T. Back, *Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*, Oxford university press, 1996.
- [23] Unmanned Dynamics Aerosim Blockset, <http://www.udynamics.com/aerosim> (accessed 27 January 2009).

پی نوشت

1. Revisit Time
2. field of view
3. skid to turn
4. heading angle
5. flowchart
6. lawn mower patrolling
7. spiral patrolling
8. inverted V
9. up wing
10. steady state level flight