

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

نوع مقاله: پژوهشی

## طراحی مسیر حرکت روبات‌های نقلیه بدون سر نشین با شارژ محدود در مسئله پوشش محیط با ارتفاعات متفاوت

نگار عباسی

دانشجوی کارشناسی ارشد علوم کامپیوتر، دانشکده علوم ریاضی - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران  
پست الکترونیکی: negarabbasi@modares.ac.ir

فاطمه زهرا صابری فر\*

استادیار علوم کامپیوتر، دانشکده علوم ریاضی - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران  
پست الکترونیکی: fz.saberifar@modares.ac.ir

### چکیده

دوره‌گرد تعمیم‌یافته و کاهش یال‌های آن گراف توسط تعریف دو همسایگی، زمان اجرای الگوریتم‌های ارائه‌شده را بهبود بخشیدیم و با طراحی چندین آزمایش، نتایج کار خود را پیاده‌سازی و تحلیل نمودیم. **واژه‌های کلیدی:** مسئله پوشش، مسیریابی حرکت روبات‌ها، روبات‌های نقلیه خودران هوایی و زمینی.

در سال‌های اخیر، کشاورزی دقیق یکی از حوزه‌های موردتوجه در روباتیک بوده است که در آن مسائل زیادی با استفاده از قابلیت‌های پهپادها و روبات‌های خودران زمینی حل شده‌اند. در طراحی مسیر حرکت پهپادها برای انجام وظایف موجود در این زمینه با محدودیت‌های مختلفی روبرو هستیم که یکی از آنها محدودیت انرژی و دیگری تغییر ارتفاع نقاط مختلف محیط است. ما در این مقاله با توجه به این دو محدودیت مهم، مسئله پوشش محیط‌های کشاورزی با ارتفاعات متفاوت توسط یک پهپاد و یک روبات خودران زمینی را بررسی کرده‌ایم. با وجود قید انرژی، می‌توان از روبات‌های زمینی خودران جهت شارژ مجدد پهپادها استفاده کرد. هدف ما رویت تمامی نقاط محیط توسط پهپاد در کمترین زمان می‌باشد. ما این مسئله را به مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته کاهش داده و نشان داده‌ایم که چگونه با داشتن جواب مسئله دوم می‌توان مسیر بهینه‌ای برای پهپاد به‌دست آورد. در واقع، با ساخت گرافی جدید به‌عنوان ورودی مسئله فروشنده

### ۱. مقدمه

مسئله پوشش محیط در علم روباتیک به معنای رویت‌پذیری تمام نقاط محیط توسط حسگرهای روبات است. به‌دست آوردن مسیر حرکت روبات جهت انجام وظیفه پوشش، بخش مهمی از مسائلی نظیر تمیزکردن محیط، کشاورزی دقیق، دیده‌بانی و نظارت، مکان‌یابی در محیط، نقشه‌برداری و جستجو و نجات را حل می‌کند [۱]. روبات‌های موردنظر ما در این مقاله، وسایل نقلیه بدون سرنشینی چون پهپادهای سبک و ارزان و روبات‌های خودران زمینی هستند. پهپادها وسایل نقلیه بدون خلبان و خودران هستند که با کنترل از راه دور پرواز می‌کنند

\* نویسنده مسئول

و امروزه به صورت گسترده در زمینه‌های نظامی و غیرنظامی به کار گرفته می‌شوند. یکی از معمول‌ترین محدودیت‌ها برای پهپادها محدودیت انرژی یا شارژ پهپاد است. پهپادهای غیرنظامی برای حداکثر سی دقیقه پرواز انرژی دارند که برای انجام فعالیت‌های مختلف از جمله پوشش محیط‌های کشاورزی کم بوده و ممکن است در حین انجام عملیات، امنیت پهپاد به خطر بیفتد. اگر جهت شارژ مجدد از یک شارژر ثابت استفاده کنیم، پهپاد بایستی زمانی را در مسیر حرکت به آن مکان صرف کند و هزینه کل مسیر افزایش می‌یابد. بنابراین در نظر گرفتن یک روبات زمینی برای پشتیبانی از پهپاد و شارژ آن به کاهش هزینه کمک خواهد کرد.

علاوه بر این، ارتفاع پرواز پهپادها عامل مهمی در میزان مصرف انرژی آن‌ها محسوب می‌شود. در محیطی با موانع با ارتفاعات متفاوت و اختلاف ارتفاعات زیاد، پرواز در یک ارتفاع امن و ثابت به طوری که با موانع محیط برخورد نکند؛ خود باعث افزایش مصرف انرژی پهپاد خواهد شد. همچنین، در پوشش محیط توسط پهپادها با اهدافی مانند نظارت، سم‌پاشی، تصویربرداری با کیفیت و با وضوح مناسب، ارتفاع پهپاد از نقاط یا اشیاء محیط اهمیت دارد. در واقع، سه معیار مهم توصیف وضوح تصاویر دوربین دوربین پهپادها عبارتند از: یک، وضوح پیکسل که چیز زیادی درباره بزرگی یک شیء در تصویر یا میزان جزئیات قابل مشاهده در تصویر نمی‌گوید. دو، فاصله نمونه‌برداری از زمین<sup>۱</sup> که به فاصله بین دوربین و شیء نیز بستگی دارد و یک معیار مهم برای تصویربرداری است ولی توانایی تشخیص یک شیء در یک تصویر را به طور کامل توصیف نمی‌کند. سه، وضوح فضایی یا وضوح زاویه‌ای<sup>۲</sup> که برخلاف فاصله نمونه‌برداری از زمین، می‌توان آن را در واحدهای متفاوتی مثل تار، نوبه تصویر، میزان اختلاف میان روشن‌ترین و تیره‌ترین بخش یک تصویر بیان کرد. بنابراین معیار مناسبی برای تعیین کمیت مشخص بودن

یک شیء در تصویر است. وضوح فضایی نیز به فاصله کانونی<sup>۳</sup> دوربین و میدان دید بستگی دارد و برای کسب بهترین وضوح فضایی، دانستن کوتاه‌ترین فاصله مجاز کانون دوربین و ماندن در این فاصله در طول ثبت داده‌ها بسیار مهم است.

یکی دیگر از کاربردهای پهپادها در کشاورزی دقیق، اسپری کود و مواد محافظت‌کننده به محصولات است. لی و همکاران [۲] نشان دادند که به ترتیب، ارتفاع پرواز، سرعت پرواز و فشار پاشش در پوشش سم‌پاش هوایی، بیشترین تاثیر را دارند. کین و همکاران [۳] نیز سه ارتفاع متفاوت ۵، ۷ و ۹ متر را برای پوشش سموم دفع آفات توسط پهپاد CD-10 بررسی کرده و دریافتند که ارتفاع ۷ متر، یکنواخت‌ترین توزیع سم را می‌دهد. پاردس و همکاران [۴] نیز به مطالعه تاثیر ارتفاع پرواز پهپادهای چند روتوری و پهپادهای بال ثابت بر مصرف انرژی و زمان پرداخته و دریافتند که با افزایش ارتفاع، انرژی مورد نیاز پهپاد افزایش می‌یابد و در نتیجه، زمان کمتری برای پرواز خواهد داشت. این مطالعات اهمیت تغییر ارتفاع پرواز پهپادها برای پوشش موثرتر محیط را نشان می‌دهند که مسئله اصلی مقاله ما می‌باشد.

با توجه به اهمیت در نظر گرفتن تغییر ارتفاع پرواز برای مسیریابی پهپادها و پوشش نقاط مختلف محیط، ما در این مقاله، کیفیت مسیر و پوشش موثر را به عنوان یک معیار مهم در مسیریابی در نظر گرفته‌ایم و در ادامه کار یو و همکارانش [۵] به مسئله پوشش محیط با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع نقاط مختلف محیط کشاورزی پرداخته‌ایم و روش آن‌ها را تعمیم داده و بر مبنای دو نوع همسایگی با الگوریتم کارایی گراف ورودی مسئله را لایه‌بندی کرده و به گراف بسیار کوچک‌تری تبدیل کرده‌ایم. در ادامه، کار یو و همکارانش [۵] را بیشتر توضیح می‌دهیم. یو و همکارانش [۵] مسئله پوشش محیط توسط یک پهپاد با زاویه دید حسگر  $\alpha$ ، با شارژ محدود و با پرواز در یک ارتفاع امن و ثابت  $H$  را بررسی کرده‌اند و از یک ماشین خودران زمینی

3- Focus

1- Ground Sample Distance(GSD)

2- Spatial resolution

با شارژ بینهایت برای شارژ پهباد استفاده کرده‌اند. آن‌ها محیط را به صورت یک یا چند، چندضلعی مدل کرده و سپس آن‌ها را با روش خیش آهنی به نوارهای مستطیلی ( $n$  سلول) به عرض زاویه دید حسگر پهباد، تقسیم‌بندی کرده‌اند. سپس در ابتدا و انتهای هر سلول دو پایگاه قرار دادند که حرکت مستقیم پهباد با سرعت ثابت در ارتفاع  $H$  از یک پایگاه به پایگاه دیگر آن سلول موجب پوشش سلول می‌شود. اگر  $\sigma$  ترتیب سلول‌های بازدید شده باشد، وقتی پوشش سلول  $j$  ام با پرواز پهباد از ورودی سلول  $j$  به خروجی آن انجام می‌شود، در حرکت از خروجی  $j$  به پایگاه ورودی سلول  $j + 1$  حالت‌های ممکن را بررسی کرده و برای هر حالت، هزینه آن نوع حرکت را متناظر با مسافت طی شده محاسبه می‌کند. این حالت‌ها عبارتند از: فرود روی روبات زمینی در خروجی  $j$  و شارژ شدن در همان محل و برخاستن برای رسیدن به ارتفاع ثابت  $H$ ؛ یا این مسیر را پرواز کند و در ورودی سلول  $j + 1$  بر روی روبات زمینی فرود بیاید و همانجا شارژ شود و برای رسیدن به ارتفاع  $H$  بلند شود؛ یا در خروجی  $j$  روی روبات زمینی فرود بیاید و در حال حمل توسط روبات زمینی شارژ شود سپس بلند شود تا به ارتفاع ثابت  $H$  برسد. آن‌ها سپس طبق یک تابع ثابت مصرف انرژی و تقسیم شارژ باتری به  $k$  سطح، تابع هزینه کل مسیر را به دست می‌آورند و به دنبال مسیری هستند که کمترین هزینه را داشته باشد. از این‌رو گرافی می‌سازند که به ازاء هر سلول، یک خوشه با  $2k$  (در هر پایگاه،  $k$  سطح شارژ) راس دارد و بین دوه‌دو رئوسی که متعلق به یک خوشه نباشند یک یال در نظر می‌گیرند و کمترین هزینه بین تمام حالت‌های ممکن حرکت بین آن دو راس را به یال متناظر نسبت می‌دهند. سپس این گراف کامل را که نمونه‌ای از مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته<sup>۴</sup> است با حل‌کننده GLNS حل کرده‌اند.

یو و همکارانش [۵] یک ارتفاع ثابت که بالاتر از تمامی نقاط محیط باشد را برای پرواز پهباد در نظر گرفته‌اند.

4- Generalized TSP (GTSP)

درحالی‌که با توجه به آنچه تاکنون در مورد ارزش تغییر ارتفاع پرواز درحین عملیات پوشش توسط پهبادهای پوشش موثر بیان شد؛ برخلاف کار یو و همکارانش [۵] و تمامی مقالاتی که در بخش ۲ برای رویکرد برمبنای GTSP ذکر می‌شود، ما در این مقاله، تغییرات ارتفاع پرواز و اثرات آن را نیز در نظر گرفته‌ایم و با چند آزمایش تاثیر آن را نشان داده‌ایم. وقتی ارتفاع امن و ثابت پهباد، زیاد باشد انرژی زیادی برای پرواز مصرف می‌شود؛ در حالی‌که تغییر ارتفاع در حین پرواز می‌تواند با همان میزان انرژی درصد پوشش محیط را افزایش دهد. همچنین، ارتفاع ثابت موجب می‌شود در کاربردهایی نظیر آبیاری و سمپاشی، درصد یکنواختی توزیع قطرات کم شود یا در تصویربرداری برای نظارت بر محیط، کیفیت تصاویر گرفته شده توسط پهباد نامطلوب شود و تاثیر عملیات کاهش یابد. ما علاوه بر در نظر گرفتن عامل مهم تغییر ارتفاع که موجب شد انواع جدیدی از حرکات پهباد را تعریف کنیم و برمبنای آن‌ها توابع هزینه پیمایش جدیدی را به مسئله اضافه کنیم؛ با تعریف همسایگی‌های وابسته به تغییر ارتفاع (آزمایش‌های بخش ۱، ۵ و ۵، ۵ نیز مزیت آن‌ها را نشان می‌دهد)، کاهش چشمگیری در اندازه گراف نمونه GTSP خود داده‌ایم.

به بیان دقیق‌تر، ما با توجه به کاربردهای بیان شده برای تغییر ارتفاع در حین پرواز، مفهوم پوشش موثر را تعریف کردیم. پوشش محیط را در صورتی پوشش موثر می‌نامیم که پهباد در ارتفاع مشخصی از شیء برای تصویربرداری، سمپاشی، آبیاری و غیره قرار گرفته باشد تا تاثیر عملیات افزایش یابد. در بخش آزمایش‌ها، ابتدا درصد پوشش موثر با کمترین هزینه را بررسی کردیم و با آزمایشی نشان دادیم که بدون در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع، علیرغم افزایش هزینه‌های شارژ و مسافت طی شده نسبت به حالت وجود تغییر ارتفاع، پوشش موثر محیط تنها ۲/۴۷٪ بوده است. سپس عامل دیگری را که در کاهش هزینه مسیر خروجی نقش دارد برای هر دو حالت بدون/با تغییر ارتفاع بررسی کردیم و بازه و مقدار مناسب این عامل برای

دستیابی به مسیر بهینه را ارائه کردیم. این عامل مقدار مسافت قابل پیمایش برای پهپاد با یک بار شارژ کامل آن است که در انتخاب پهپاد مناسب برای عملیات پوشش با کمترین هزینه، تاثیرگذار است. علاوه بر این، در حالت‌هایی که به دلایل صرفه جویی در هزینه‌ها یا سایر علل، امکان تغییر پهپاد یا ارتقاء باتری آن وجود ندارد، عامل دیگری را نیز در دو حالت بدون/با تغییر ارتفاع بررسی کردیم که در هزینه مسیر، زمان اجرا و اندازه گراف ورودی مسئله موثر است. این عامل، نرخ مصرف باتری یا سطح گسسته‌سازی باتری ( $k$ ) است که برای مسئله فرض شده است. در واقع با کاهش مقدار  $k$ ، نیاز پهپاد به شارژ مجدد و در نتیجه هزینه مسیر افزایش می‌یابد و با افزایش آن، نیاز به شارژ مجدد و هزینه مسیر کاهش می‌یابد ولی زمان اجرا به دلیل افزایش اندازه گراف ورودی، افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش مقدار  $k$  تا حد مشخصی، سبب بهبود موثر در جواب بهینه خواهد شد و افزایش بیش از حد آن، تاثیر خاصی در بهبود جواب نخواهد داشت. از این رو، پیدا کردن مقدار مناسب برای پارامتر  $k$  خود یک مسئله ارزشمند است که ما این مقدار را در آزمایش‌های خود به دست آورده‌ایم.

در ادامه، در بخش ۲ این مقاله به مرور ادبیات، در بخش ۳ به تعریف مسئله، در بخش ۴ به ارائه الگوریتم حل مسئله، در بخش ۵ به پیاده‌سازی تعدادی آزمایش و تحلیل نتایج پرداخته و در بخش ۶ به نتیجه‌گیری و بیان تعدادی از کارهای آتی مقاله خود پرداخته‌ایم.

## ۲. مرور ادبیات

در بسیاری از مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی حرکت پهپادها برای پوشش محیط‌های سه بعدی با قید انرژی، ارتفاع پرواز پهپادها ثابت فرض شده و به اندازه‌ای است که با موانع محیط برخورد نکنند؛ ولی از جمله مطالعاتی که با رویکردهای متفاوت به بررسی تغییر ارتفاع برای پوشش محیط توسط پهپادها پرداخته‌اند، می‌توان به کارهای زیر اشاره کرد. چنگ و همکاران [۶] مسئله یافتن

مسیر بهینه حرکت پهپادی با یک حسگر ثابت با زاویه دید ثابت برای پوشش سه‌بعدی محیط‌های شهری را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها اجسام و ساختمان‌های شهری را به صورت استوانه‌ها و یا نیم‌کره‌ها (مجموعه‌ای از ساختمان‌ها) مدل کرده و سعی کردند بین ارتفاع پرواز مناسب، کوتاهی مسیر و کیفیت تصویر، تناسب برقرار کنند و یک کران پایین برای زمان پوشش کامل و راهبرد پوششی ارائه کردند. احمد و همکاران [۷] به مطالعه مسئله مسیریابی پرواز پهپادهای کوچک در محیطی سه‌بعدی با موانع ثابت پرداختند. آن‌ها با ساخت نقشه مسیر روی‌ت‌پذیری<sup>۵</sup> سه‌بعدی پهپاد سعی کردند مسیر کارایی برای پرواز پهپاد ارائه کنند به طوری که مصرف انرژی پهپاد کارا بوده و با موانع نیز برخورد نکند. استفاس و همکاران [۸] برای پوشش مجموعه‌ای متناهی از پایگاه‌ها و تصویربرداری با کیفیت‌های داده‌شده از آن پایگاه‌ها توسط یک پهپاد، محیط را با مجموعه‌ای از مخروط‌ها مدل کردند. آن‌ها مسئله یافتن کوتاه‌ترین دور برای بازدید از این پایگاه‌ها (مخروط‌های با ارتفاعات و زوایای مختلف تصویربرداری) را با تبدیل به مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته برای مخروط‌ها<sup>۶</sup> با الگوریتمی تقریبی با ضریب تقریب چندجمله‌ای از  $1 + \log(h_{max}/h_{min})$  که در آن  $h_{max}$  بیشترین ارتفاع مخروط و  $h_{min}$  کمترین ارتفاع مخروط است، حل کرده‌اند. در ادامه، ماینی و همکاران [۹] الگوریتم تقریبی ایسلر را برای مشاهده نقاط خاصی از محیط با ارتفاع مناسب و موانع تعمیم داده‌اند. آن‌ها برای افزودن ارتفاع به محیط دو بعدی، محیط را به صورت یک زنجیره  $۲/۵$  بعدی مدل کرده‌اند و مسئله را با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل‌سازی کرده‌اند و الگوریتم تقریبی [۸] را تعمیم داده‌اند. پنگ و ایسلر [۱۰] نیز برای مسئله پوشش محیط‌های شهری به کمک پهپادها، الگوریتمی تقریبی با ضریب تقریب  $O(\frac{k}{\tan \alpha} \max[L_B, W_B, H_B])$  ارائه کرده‌اند که در آن  $B$  مجموعه ساختمان‌های موجود در یک صحنه از شهر،  $L_B, W_B, H_B$  به ترتیب طول، عرض و

5- Visibility roadmap

6- Cone Traveling Salesman Problem with Neighborhoods (Cone-TSPN)

ارتفاع کمینه جعبه دربرگیرنده  $B^y$  بوده و  $\alpha$  بیشینه زاویه دید پهپاد می باشد.

از سویی دیگر، مسیریابی پهپادها در مسئله پوشش با تمرکز بر قید انرژی پهپاد نیز به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. فو و همکاران [۱۱] با تعریف سه تابع هزینه به بررسی انرژی مصرفی پهپادها پرداخته اند و برای مسئله پوشش محیط یک الگوریتم تکاملی ارائه داده اند. هوانگ و همکاران [۱۲] با الگوریتم مورچگان به مسئله مسیریابی پهپادها با کمترین هزینه در محیطی با موانع ایستا و پویا پرداختند. زامیت و همکاران [۱۳] به بررسی و مقایسه عملکرد الگوریتم RRT و  $A^*$  برای مسئله پوشش محیط توسط پهپادها پرداخته اند. میچل و همکاران [۱۴] برای محاسبه مسیرها، پهپادهای کم انرژی را با پهپادهای با شارژ کامل جایگزین کرده اند به طوری که این تعویض ها کمینه باشد و با برنامه ریزی غیرخطی، مسئله را مدل و حل کرده اند. احمد و همکاران [۱۵] روشی برای گسسته سازی محیط ارائه کرده اند که امکان مصرف کمینه انرژی در عملیات طولانی را فراهم می آورد. سپس با استفاده از چند پهپاد در فضای دو بعدی و چند پایگاه برای پوشش، مسیریابی را به روش اکتشافی به دست آورده اند که با موانع برخورد ندارند و کمترین انرژی را مصرف می کنند. در ادامه، رویکرد جدیدی که در مطالعات اخیر مورد توجه بوده است، تقسیم بندی محیط و تبدیل آن به یک گراف وزندار و سپس تبدیل آن به نمونه ای از مسئله فروشنده دوره گرد تعمیم یافته و حل مسئله با حل کننده های شناخته شده مثل GLNS, Concord و غیره و تبدیل جواب آن ها به جواب مسئله اصلی می باشد. از جمله، یو و همکاران [۱۶] که الگوریتم پوششی برای یک پهپاد با سینماتیک دابینز و تبدیل مسئله به مسئله فروشنده دوره گرد نامتقارن ارائه داده اند. در ادامه کار آن ها، لویز و همکاران [۱۷] به بررسی همان مسئله با پهپادهای دابینز و تقسیم بندی نیمه خیش آهنی محیط پرداخته اند. آن ها اثبات کرده اند طراحی حرکت دابینزها برای پوشش محیط NP-  
7- Minimum enclosing box

سخت می باشد. توکه کار و همکاران [۱۸] نیز به بررسی مسئله مسیریابی یک پهپاد و یک روبات زمینی خودران برای پوشش محیط کشاورزی پرداختند به طوری که روبات زمینی در حالت ایستا، قابلیت شارژ پهپاد را داشته باشد و بتواند پهپاد را بر روی خود سوار کرده و به نقطه دیگری ببرد بدون آن که پهپاد انرژی مصرف کند. آن ها برخلاف مایینی [۹] هر دو مسیر پهپاد و روبات زمینی را همزمان می سازند. در ادامه، یو و همکاران [۱۹] علاوه بر شارژ ایستای پهپاد توسط روبات زمینی، قابلیت شارژ پهپاد در هنگام حمل آن را نیز به روبات زمینی افزودند. یو و همکاران [۵] نیز با تغییراتی در ساخت گراف و تبدیل مسئله به مسئله فروشنده دوره گرد تعمیم یافته کار کرده اند. یکی از مسائل اصلی در مسئله پوشش، تضمین پوشش کامل محیط است. برای ساده سازی مسئله پوشش، تجزیه سلولی محیط و تقسیم فضای آزاد پیکربندی به مناطق کوچکتر به نام سلول انجام می شود. روش های مختلف تجزیه سلولی وجود دارد که رایج ترین روش ها در مسئله پوشش پهپادها، تجزیه سلولی دقیق و تقریبی [۲۰ و ۲۱] است. ما نیز از تجزیه سلولی دقیق خیش آهنی استفاده می کنیم که مجموعه ای از نوارهای مستطیل شکل، هریک با عرض شعاع دید پهپاد می باشد. این نوع تجزیه، شبیه ردیف های گیاهان کاشته شده در زمین های کشاورزی است. ما در این مقاله با تعمیم روش یو و همکاران [۵] به بررسی پوشش محیط به وسیله یک پهپاد و یک روبات زمینی برای شارژ پهپاد می پردازیم و با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع برای هر بخش از محیط، آن را به طور دقیق تر و با صرف انرژی کاراتری پوشش می دهیم. برای مقایسه بهتر در جدول ۱ خلاصه کارهای مرتبط را می بینید.

### ۳. تعریف مسئله

قطعات زمین یک محیط کشاورزی را می توان با چندضلعی ها تقریب زد که در هر چندضلعی، ارتفاع نقاط را متناظر با ارتفاع گیاه یا درخت کاشته در آن نقطه از

جدول ۱: خلاصه کارهای مرتبط با مسیریابی حرکت پهپادها در مسئله پوشش محیط از سه منظر

رویکرد	مرجع	موضوع و دستاورد	ارتفاع	مانع	قید انرژی	نحوه مدل سازی محیط و راه حل
در نظر گرفتن ارتفاع متغیر به صورت سه بعدی	[۶]	ارائه یک راهبرد حرکت برای پوشش کامل محیط شهری	متغیر	ثابت	X	استوانه‌ها و نیمکره‌ها (سه بعدی)
	[۷]	مسیریابی با انرژی بهینه	متغیر	ثابت	✓	ایجاد نقشه مسیر رویت پذیری و مکعب مستطیل برای موانع
	[۸]	پوشش پایگاه‌ها با کیفیت تصویربرداری مطلوب با الگوریتم تقریبی	متغیر	X	X	مخروط‌ها
	[۹]	پوشش پایگاه‌های خاص با کیفیت تصویربرداری مطلوب، الگوریتم تقریبی و LP	متغیر	ثابت	X	زنجیره ۲/۵ بعدی
	[۱۰]	الگوریتم تقریبی برای پوشش محیط شهری	متغیر	ثابت	✓	باکس
بدون در نظر گرفتن پارامتر ارتفاع و تعریف به مسئله به صورت دو بعدی	[۱۱]	نقطه با شروع و پایان، بررسی توابع هزینه متفاوت برای کیفیت مسیر با قید انرژی پهپاد، مسیریابی با الگوریتم‌های تکاملی اکتشافی	X	ثابت	✓	نقاط و موانع ۲ بعدی با مجموعه‌ای از مسیرهای تصادفی و شدنی بین نقاط
	[۱۲]	نقطه با شروع و پایان، الگوریتم مورچگان، مسیریابی با طول بهینه	X	ایستا و پویا	X	نقاط و موانع دو بعدی
	[۱۳]	پوشش با الگوریتم‌های RRT* و A*، نقطه با شروع و پایان داده شده	X	ثابت	X	نقاط و موانع دو بعدی
	[۱۴]	حرکت گروهی پهپادها با فرم خاص، حل برنامه‌ریزی غیرخطی، تعویض پهپادها برای مدیریت انرژی مصرفی آن‌ها	ثابت	X	✓	مقایسه مسیرها در دو بعد
	[۱۵]	پوشش مجموعه‌ای از خوشه‌ها، چند پهپاد، روش اکتشافی و مسیریابی بهینه با MILP	X	X	✓	گسسته سازی محیط در ۲ بعد
در نظر گرفتن ارتفاع ثابت و حل مسئله به صورت دو بعدی و بر مبنای GTSP	[۱۶]	پهپاد دابینز، تبدیل مسئله به TSP نامتقارن و حل با حل کننده LKH	ثابت	X	X	بر مبنای GTSP، تقسیم سلولی خیش آهنی در ۲ بعد و ساخت گراف
	[۱۷]	پهپاد دابینز، تبدیل مسئله به مسئله GTSP و حل با LocalSolver	ثابت	X	X	بر مبنای GTSP، تقسیم سلولی نیمه خیش آهنی، ساخت و کاهش گراف
	[۱۸]	پوشش پایگاه‌ها، یک پهپاد و UGV برای شارژ ایستای پهپاد و حمل آن، الگوریتم تقریبی، Sampling TSPN	ثابت	X	✓	بر مبنای GTSP، گراف کامل، ۲ بعدی
	[۱۹]	پوشش پایگاه‌ها، یک پهپاد و چند UGV برای شارژ ایستا و حین حمل پهپاد، حل با concorde و GLNS، مسیریابی UGV با ILP	ثابت	X	✓	بر مبنای GTSP و ساخت گراف مسیرها و هزینه‌ها از روی آن
	[۵]	یک پهپاد و UGV برای شارژ ایستا و حین حمل پهپاد، تبدیل به مسئله TSPN و حل با GLNS	ثابت	X	✓	بر مبنای GTSP، تقسیم سلولی خیش آهنی در ۲ بعد و ساخت گراف

پهپاد بدون شارژ مجدد، قابلیت پرواز از ابتدا تا انتهای یک سلول را داشته باشد. با در نظر گرفتن ارتفاعات مختلف محیط، می‌توان هر سلول را به یک یا چند زیر سلول با ارتفاع مشخص تقسیم کرد. پهپاد با گذر از هر زیر سلول در ارتفاع متناظر با آن زیر سلول، آن را پوشش موثر (فیلم برداری، آبپاشی یا سمپاشی با کیفیت خاص) می‌دهد به طوری که با هیچ مانعی برخورد نمی‌کند. بنابراین هر سلول شامل مجموعه‌ای از زیر سلول‌ها  $C_i = \{c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^m\}$  می‌باشد و مقدار  $m$  برای هر سلول متفاوت است. ارتفاع زیر سلول  $j$  از سلول  $i$  را با  $h_i^j$  نشان می‌دهیم. حال به تعریف دقیق مسئله می‌پردازیم:

زمین در نظر می‌گیریم. همان‌طور که گفتیم، برای تضمین پوشش کامل محیط و ساده‌سازی مسئله پوشش از تجزیه سلولی محیط استفاده می‌شود. ما نیز در این مقاله، هر یک از چندضلعی‌های ورودی را به روش خیش آهنی، تجزیه می‌کنیم و هر چندضلعی را به نوارهای مستطیل شکل با عرض محدوده دید پهپاد تقسیم بندی می‌کنیم. هر نوار را یک سلول می‌نامیم و آن را با  $C_i$  نشان می‌دهیم. اگر حداکثر مسافت قابل پیمایش با شارژ کامل پهپاد را با  $D_{max}$  نشان دهیم و چندضلعی را با توجه به محدوده دید پهپاد و  $D_{max}$  آن به سلول‌هایی تقسیم کنیم؛ پهپاد با پرواز از میان هر سلول، کل سلول را پوشش می‌دهد. از طرف دیگر هر چندضلعی باید به گونه‌ای تقسیم بندی شود که



جدول ۲: نمادهای مورد استفاده در مقاله و تعاریف آنها

تعریف	نماد
زمان لازم برای حرکت روبات زمینی از محل خروجی زیرسلول $P$ ام از سلول $i$ ام به محل ورود زیرسلول $Q$ ام از سلول $j$ ام.	$t_G(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q)$
زمان لازم برای پرواز پهپاد از ورودی زیرسلول $P$ ام از سلول $i$ ام به خروجی همان زیرسلول با ارتفاع زیرسلول $i$ از سلول $P$ ام.	$t_A(\gamma_i^p, \bar{v}_i^p, h_i^p)$
زمان لازم برای حرکت پهپاد از خروجی زیرسلول $P$ ام از سلول $i$ ام به محل ورود زیرسلول $Q$ ام از سلول $j$ ام با ارتفاع $P$ ام از سلول $i$ ام.	$t_A(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q, h_i^p)$
لیست تمام زیرسلول‌هایی که پهپاد هنگام حرکت از $\bar{v}_i^p$ به $\gamma_j^q$ در طول پرواز از آنها گذر می‌کند.	$ILIST(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q)$
اندازه لیست $ILIST(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q)$ که برابر با تعداد زیرسلول‌هایی است پهپاد هنگام حرکت از $\bar{v}_i^p$ به $\gamma_j^q$ در طول پرواز از آنها گذر می‌کند.	$L = card(ILIST)$
کوتاه‌ترین مسیر میان $\bar{v}_i^p$ (پایگاه خروجی زیرسلول $P$ ام از سلول $i$ ام) و $\gamma_j^q$ (پایگاه ورودی زیرسلول $Q$ ام از سلول $j$ ام) با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع در لیست زیرسلول‌های بین این دو پایگاه.	$TD = td(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q)$
زمان حرکت پهپاد در طول مسیر به اندازه فاصله $TD = td(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q)$	$t_{AT}(\bar{v}_i^p, \gamma_j^q, TD)$
زمان برخاستن از روی روبات زمینی / نشستن روی روبات زمینی برای رسیدن به ارتفاع مشخص / فرود پهپاد. به عبارت دیگر $t_{TL}(h_i^p, h_j^q) =  h_i^p - h_j^q $ به طوری که:	$t_{TL}(h_i^p, h_j^q)$

### مسئله پوشش محیط با تغییرات ارتفاع

ورودی: محیط به صورت چندضلعی‌های تقسیم شده به سلول‌های  $C_i = \{c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^m\}$  و هر زیرسلول  $c_i^j$  با ارتفاع مشخص  $h_i^j$ ، یک پهپاد با محدوده دید  $\omega$ ، یک روبات زمینی با شارژ بینهایت خروجی: مسیر حرکت با کمترین هزینه برای پهپاد به طوری که تمامی نقاط چندضلعی‌ها را با ارتفاع متناظر آن نقاط رویت کند و به مانعی برخورد نکند.

ما در مسئله پوشش محیط با تغییرات ارتفاع، فرض می‌کنیم که سرعت پهپاد ثابت بوده و شارژ در سرعت ثابت انجام می‌شود و برای روبات زمینی شارژ بی‌نهایت را در نظر گرفته‌ایم و عدم وجود باد و شیب در زمین را نیز فرض کرده‌ایم. در ابتدا و انتهای هر زیرسلول یک پایگاه در نظر گرفته و آنها را  $\alpha_i^j$  و  $\beta_i^j$  می‌نامیم. اگر پهپاد در یک خط مستقیم از  $\alpha_i^j$  به  $\beta_i^j$  یا از  $\beta_i^j$  به  $\alpha_i^j$  با ارتفاع مناسب سلول  $c_i^j$  حرکت کند، زیرسلول  $j$  از سلول  $i$  پوشش داده می‌شود. پهپاد می‌تواند از هر یک از پایگاه‌های  $\alpha_i^j$  یا  $\beta_i^j$  وارد زیرسلول شود. هنگامی که پهپاد وارد یک زیرسلول می‌شود، باید کل آن را ببوشاند و از پایگاه دیگر خارج شود. الگوریتم، یکی از پایگاه‌ها را به عنوان پایگاه ورودی برمی‌گزیند.  $\gamma_i^j \in \{\alpha_i^j, \beta_i^j\}$  را پایگاه ورودی سلول  $i$  ام، زیرسلول  $j$  ام تعریف می‌کنیم که توسط الگوریتم

پوشش انتخاب می‌شود. به همین ترتیب،  $\bar{v}_i^j$  نشانگر پایگاه خروجی سلول  $i$  ام، زیرسلول  $j$  ام می‌باشد. پس، داریم:  $\sigma_i^j \in \{1, 2, \dots, mn\}$  فرض کنید  $\bar{v}_i^j = \{\alpha_i^j, \beta_i^j\} \setminus \gamma_i^j$  ترتیب زیرسلول‌های بازدید شده را نشان دهد. برای مثال،  $\sigma_i^j$  نشان‌دهنده بازدید زیرسلول  $j$  ام از سلول  $i$  ام ( $c_i^j$ ) می‌باشد. سایر تعاریف مورد نیاز برای بیان دقیق الگوریتم در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

فرض کنید  $\pi$  مسیر حرکت پهپاد از هر زیرسلول به زیرسلول بعدی باشد. هزینه این مسیر به نحوه حرکت پهپاد بین زیرسلول‌ها بستگی دارد. پیمایش از  $\gamma_i^p$  به  $\bar{v}_i^p$  و سپس به  $\gamma_j^q$  در امتداد  $\pi$  را در نظر بگیرید. حالت‌های ممکن در این پیمایش به صورت زیر می‌باشد:

۱. پهپاد باید از  $\gamma_i^p$  به  $\bar{v}_i^p$  در ارتفاع  $h_i^p$  پرواز کند. طبق جدول ۲، زمان لازم این پرواز با  $t_A(\gamma_i^p, \bar{v}_i^p, h_i^p)$  نشان داده می‌شود.

۲. سپس می‌تواند انتخاب کند که در  $\bar{v}_i^p$  روی روبات زمینی فرود بیاید و در همانجا شارژ شود و برای رسیدن به ارتفاع  $h_i^p$  در  $\bar{v}_i^p$  بلند شود. یک تابع مشخصه  $I_1(\bar{v}_i^p)$  تعریف می‌کنیم که نشان می‌دهد پهپاد این کار را انجام می‌دهد یا خیر.

۳. پهپاد می‌تواند انتخاب کند که از  $\bar{v}_i^p$  به  $\gamma_j^q$  پرواز کند یا در  $\gamma_i^p$  روی روبات زمینی فرود بیاید و درحالی که توسط

روبات زمینی به مکان بعدی حمل می‌شود، شارژ گردد. سپس در  $\gamma_j^q$  بلند شود تا به ارتفاع  $h_j^q$  برسد. تابع مشخصه  $I_2(\gamma_j^q)$  نشان می‌دهد پهپاد با روبات زمینی حرکت می‌کند یا خیر. یک مورد خاص برای این حالت وجود دارد که بخواهیم به ترتیب دو زیرسلول متوالی در یک سلول را پیمایش کنیم. در این حالت  $q = p + 1$  و  $i = j$  بوده و خروجی زیرسلول اولیه با ورودی زیرسلول بعدی هر دو از یک نوع  $\alpha_i^p$  یا  $\beta_i^p$  باشند. در واقع یعنی مستقیماً از خروجی یک زیرسلول به ورودی زیرسلول دیگری برویم که هر دو در یک مکان قرار دارند که نه نیاز به پرواز پهپاد و نه نیاز به روبات زمینی برای حرکت همزمان با شارژ خواهیم داشت. در این حالت، همواره تابع مشخصه  $I_2(\gamma_j^q)$  را برابر با مقدار صفر قرار می‌دهیم. هر چند در این حالت نیز مقدار هزینه پرواز با  $t_{TA}(\bar{\gamma}_i^p, \gamma_j^q, td)$  محاسبه می‌شود ولی چون مکان دو پایگاه  $\bar{\gamma}_i^p$  و  $\gamma_j^q$  یکسان است هزینه پرواز نیز برابر صفر می‌شود. در حالت‌هایی که زیرسلول  $p$  و  $q$  از هم فاصله دارند هزینه مسیر را از طریق  $t_{TA}(\bar{\gamma}_i^p, \gamma_j^q, td)$  محاسبه می‌کنیم.

۴. نهایتاً پهپاد می‌تواند انتخاب کند که روی روبات زمینی در  $\gamma_j^q$  فرود بیاید و همانجا شارژ شود و برای رسیدن به ارتفاع  $h_j^q$  در  $\gamma_j^q$  بلند شود.

بر اساس این انتخاب‌ها، تابع هزینه پیمایش از ورودی زیرسلول  $c_i^p$  یعنی  $\gamma_i^p$  به ورودی زیرسلول  $c_j^q$  یعنی  $\gamma_j^q$  در راستای مسیر  $\pi$  به صورت زیر مدل می‌شود:

$$T(\gamma_i^p, \gamma_j^q) = t_A(\gamma_i^p, \bar{\gamma}_i^p, h_i^p) + I_1(\bar{\gamma}_i^p)[t_{TL}(0, h_i^p) + t_{TL}(h_i^p, 0) + r.b(\bar{\gamma}_i^p, \bar{\gamma}_i^p)] + (1 - I_2(\bar{\gamma}_i^p)) [t_{TA}(\bar{\gamma}_i^p, \gamma_j^q, td)] + I_2(\bar{\gamma}_i^p) [\max\{t_G(\bar{\gamma}_i^p, \bar{\gamma}_j^q), r.b(\bar{\gamma}_i^p, \bar{\gamma}_j^q)\}] + t_{TL}(0, h_j^q) + t_{TL}(h_i^p, \cdot)] \quad (1)$$

تابع  $b(\cdot)$  میزان باتری که پهپاد باید بین دو پایگاه ورودی دوباره شارژ شود را به دست می‌آورد. باتری پهپاد با نرخ ۲ در واحد زمان شارژ می‌شود و با نرخ ثابت یک واحد تخلیه می‌شود. توجه کنید که در پیمایش بخش دوم مسیر، اگر  $I_2(\gamma_j^q) = 0$  باشد یعنی برای حرکت به

زیرسلول بعدی پرواز کنیم، ممکن است به زیرسلولی برویم که مجاور با زیرسلول اولیه باشد. در این صورت طول لیست  $ILIST(\bar{\gamma}_i^p, \gamma_j^q)$  برابر صفر یعنی  $L = 0$  خواهد بود که این باعث می‌شود هزینه مسیر بدون تغییر ارتفاع بوده و کاهش یابد. هنگامی که پهپاد از  $\bar{\gamma}_i^p$  به  $\gamma_j^q$  پرواز می‌کند در طول مسیر باید زمانی که به زیرسلول جدیدی وارد می‌شود ارتفاع خود را نسبت به زیرسلول جدید تغییر دهد. بنابراین با استفاده از  $ILIST(\bar{\gamma}_i^p, \gamma_j^q)$  با طول  $LL$  هزینه تغییرات ارتفاع را به مسیر اضافه می‌کنیم. در مسئله ما، تعداد کل زیرسلول‌ها برابر  $N = mn$  می‌باشد. بنابراین تابع هزینه به صورت  $T(N) = \sum_{j=1}^{N-1} T(\gamma_i^p, \gamma_j^q) + t_A(\gamma_N^p, \bar{\gamma}_N^p, h_N^p)$  می‌باشد که قسمت دوم آن مربوط به آخرین زیرسلولی است که پوشانده می‌شود.

#### ۴. الگوریتم حل مسئله پوشش محیط با تغییرات ارتفاع

ابتدا مسئله را به مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم یافته تبدیل می‌کنیم که در آن، گراف ورودی به جای مجموعه‌ای از رئوس، مجموعه‌ای از نواحی است و هدف، یافتن دور همیلتونی با کمترین هزینه در گراف است که دقیقاً یک راس از هر ناحیه را ملاقات کند. ما نیز برای حل مسئله خود، هر زیرسلول از محیط را به عنوان یک ناحیه در نظر گرفته و به دنبال یک دور همیلتونی با کمترین هزینه در گراف معادل محیط برای پوشش یا رویت تمام زیرسلول‌ها هستیم. ابتدا ساخت گراف ورودی را توضیح داده و سپس الگوریتم را مطرح می‌کنیم.

#### ۴-۱ ساخت گراف ورودی

گره‌ها و دسته‌بندی‌ها. باتری پهپاد را به  $k$  بخش گسسته می‌کنیم و به هر پایگاه  $\alpha_i^p$  و  $\beta_i^p$  از هر زیرسلول،  $k$  سطح باتری اختصاص می‌دهیم. هر کدام از این‌ها یک رأس در گراف خواهد بود. در واقع ما برای هر زیرسلول،  $2k$  رأس تولید می‌کنیم. پس برای هر زیرسلول یک دسته ایجاد می‌کنیم. هر دسته شامل  $2k$  رأس که  $k$  رأس از آن‌ها مربوط به  $\alpha_i^p$  و  $k$  رأس دیگر مربوط به  $\beta_i^p$  می‌باشد.



پیش از توضیح نحوه اتصال یال‌های گراف به مشاهده و تعاریف زیر توجه کنید که در ساخت یال‌ها موثر هستند.

فاصله در این مقاله به صورت فاصله اقلیدسی میان دو گره تعریف می‌شود. بنابراین فاصله دو سلول از یکدیگر برابر با کوتاه‌ترین فاصله اقلیدسی میان گره‌های آن دو سلول

$$\text{است: } \text{Dist}(c_i^p, c_j^q) = \left( (x_{c_i^p} - x_{c_j^q})^2 + (y_{c_i^p} - y_{c_j^q})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

**مشاهده:** پهپاد تمایل دارد در مسیری حرکت کند که ابتدا سلول‌های هم‌ارتفاع را بپوشاند. دلیل این تمایل، کاهش هزینه برای تغییر ارتفاع در هنگام ورود به سلول با ارتفاع متفاوت می‌باشد (طبق آزمایش ۵,۱).

**تعریف همسایگی اول:** سلول  $c_i^p$  در همسایگی سلول  $c_j^q$  قرار دارد اگر اختلاف ارتفاع آن دو سلول به اندازه  $\varepsilon$  واحد باشد یعنی  $|h_i^p - h_j^q| = \varepsilon$ . وقتی  $\varepsilon = 0$  باشد سلول‌هایی با یکدیگر همسایه هستند که دقیقاً هم ارتفاع باشند.

**تعریف همسایگی دوم:** سلول  $c_j^q$  در همسایگی سلول  $c_i^p$  قرار دارد اگر  $c_j^q$  در مجموعه  $X$  نزدیک‌ترین سلول به  $c_i^p$  قرار داشته باشد.

**یال‌ها:** بین هر جفت رأس که به یک دسته تعلق ندارند و در همسایگی یکدیگر قرار دارند یک یال ایجاد می‌کنیم. هر یال نشانگر دو مرحله حرکت پهپاد است: مرحله اول پوشش زیرسلول و مرحله دوم حرکت از محل خروجی زیرسلول اول به سمت ورودی زیرسلول دوم است. پهپاد باید همیشه در اولین مرحله پرواز کند و در مرحله دوم می‌تواند ترکیبی از عملیات‌های شارژ مجدد در مکان، پرواز با تغییر ارتفاع، و/یا شارژ مجدد در حین سفر با روبات زمینی انجام شود. در مرحله دوم، ممکن است پهپاد از زیرسلول‌هایی عبور کند که ارتفاعی بیش از ارتفاع فعلی پرواز آن داشته و با توجه به  $ILIST(.)$  نیاز به تغییر ارتفاع باشد. در صورت در نظرنگرفتن همسایگی برای ساخت یال‌های گراف، گراف ساخته شده بسیار نزدیک به گراف کامل خواهد بود و تنها یال‌هایی را ندارد که رؤس انتهایی آن یال‌ها، متعلق به یک زیرسلول باشند. با توجه به

دو تعریف فوق برای همسایگی، یال‌های گراف را می‌توان کاهش داد. یکی از مهم‌ترین مواردی که زمان اجرای الگوریتم کلی مسئله را بالا می‌برد، ساخت گراف تقریباً کامل است. این درحالی است که بسیاری از یال‌های گراف بلااستفاده هستند. این یال‌ها مربوط به رؤسی از گراف هستند که فاصله زیادی از یکدیگر دارند. از آنجایی که هر یک یال نشان‌دهنده حرکت از یک سلول به سلول دیگر می‌باشد بنابراین منطقی‌تر است که سلول‌ها را به ترتیب پوشش دهیم و یا سلول‌هایی که بسیار نزدیک به یکدیگر هستند را پوشش دهیم. در ادامه از علائم  $F$  به معنای پرواز و از  $D$  و  $U$  برای نشستن و برخاستن پهپاد، از  $T$  برای نشستن پهپاد بر روی روبات زمینی و شارژ آن در هنگام حرکت روبات زمینی استفاده می‌کنیم. تابع هزینه معادله (۱) به نوع حرکت پهپاد بستگی دارد که انتخاب نوع حرکت نیز به سه تابع دودویی  $I_1(\bar{y}_i^p)$  و  $I_2(\bar{y}_i^p)$  و  $I_1(\bar{y}_j^q)$  بستگی دارد. به جز پیمایش دو زیرسلول متوالی از یک سلول،  $2^3$  حالت برای انتخاب وجود دارد که سه حالت از آن‌ها تکراری بوده و نیاز به محاسبه آن‌ها نیست. درحالت  $i = j$  و  $q = p + 1$ ، یال  $F - DTU$  نیز وجود ندارد زیرا در حرکت از خروجی به ورودی دو زیرسلول متوالی نیازی به حرکت روبات زمینی هنگام شارژ شدن نیست.

**وزن یال‌ها:** از بین هزینه هر ۵ حالت (در صورت امکان)، کمترین هزینه را به عنوان وزن هر یال قرار می‌دهیم. جدول ۲ را ببینید. نحوه محاسبه وزن یال  $(v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j})$ ، قابل تعمیم برای محاسبه وزن یال‌های بین رؤس  $v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\beta_j^q}^{k_j}$  و  $v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}$  نیز هست. هنگام حرکت از رأس  $v_{\alpha_i^p}^{k_i}$  به رأس  $v_{\alpha_j^q}^{k_j}$  از  $k_i$  برای نشان دادن باتری پهپاد در  $v_{\beta_i^p}^{k_i}$  استفاده می‌کنیم. نوع یال منتخب را نیز برای هر یال نگه می‌داریم. پس وزن یال برابر با

$$T(v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}) = \min\{T_{F-F}, T_{F-FDU}, T_{F-DUFDU}, T_{F-DUF}, T_{F-DTU}\} \text{ می‌باشد.}$$

جدول ۲: نوع یال‌ها و تابع محاسبه وزن هر نوع یال

تابع هزینه	نوع حرکت از رأس $v_{\alpha_i^p}^{k_i}$ تا رأس $v_{\alpha_j^q}^{k_j}$
$T_{F-F} \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right) = t_A \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\beta_i^p}^{k_i}, h_i^p \right) + t_{TA} \left( v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}, td \right)$	<b>F - F</b> : اگر شارژ مورد نیاز برای حرکت از $\alpha_i^p$ تا $\beta_i^p$ و سپس تا $\alpha_j^q$ بیشتر از $k_j - k_i$ باشد، وزن این یال را $\infty$ قرار می‌دهیم.
$T_{F-FDU} \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right) = t_A \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\beta_i^p}^{k_i}, h_i^p \right) + t_{TL} \left( h_i^p, 0 \right) + t_{TL} \left( 0, h_j^q \right) + r.e + t_{TA} \left( v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}, td \right)$	<b>F-FDU</b> : اگر میزان شارژ مورد نیاز برای حرکت از $\alpha_i^p$ تا $\beta_i^p$ و سپس تا $\alpha_j^q$ بیشتر از $k_j - k_i$ باشد، وزن این یال را $\infty$ قرار می‌دهیم. e: میزان شارژ لازم پهباد $e = \max \{ 0, k_j - (k_i - \ \alpha_i^p - \beta_i^p\ _2 + \ \beta_i^p - \alpha_j^q\ _2) \}$
$T_{F-DUFDU} \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right) = t_A \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\beta_i^p}^{k_i}, h_i^p \right) + t_{TL} \left( h_i^p, 0 \right) + t_{TL} \left( 0, h_i^p \right) + r.e_1 + t_{TL} \left( h_i^q, 0 \right) + t_{TL} \left( 0, h_j^q \right) + r.e_2 + t_{TA} \left( v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}, td \right)$	<b>F - DUFDU</b> : اگر میزان شارژ مورد نیاز برای حرکت از $\alpha_i^p$ تا $\beta_i^p$ بیشتر از $k_i - k_i'$ باشد و شارژ لازم برای حرکت از $\beta_i^p$ تا $\alpha_j^q$ نیز بیشتر از $k_j - k_i'$ باشد، وزن یال را $\infty$ قرار می‌دهیم. $e_1 = \max \{ 0, k_i' - (k_i - \ \alpha_i^p - \beta_i^p\ _2) \}$ $e_2 = \max \{ 0, k_j - (k_i' - \ \beta_i^p - \alpha_j^q\ _2) \}$
$T_{F-DUF} \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right) = t_A \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\beta_i^p}^{k_i}, h_i^p \right) + t_{TL} \left( h_i^p, 0 \right) + t_{TL} \left( 0, h_j^q \right) + r.e + t_{TA} \left( v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j}, td \right)$	<b>F - DUF</b> : اگر میزان شارژ لازم برای حرکت از $\alpha_i^p$ تا $\beta_i^p$ بیشتر از $k_i - k_i'$ و شارژ لازم برای حرکت از $\beta_i^p$ تا $\alpha_j^q$ نیز بیشتر از $k_j - k_i'$ باشد، وزن یال را $\infty$ قرار می‌دهیم. $e = \max \{ 0, k_i' - (k_i - \ \alpha_i^p - \beta_i^p\ _2) \}$
$T_{F-DTU} \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right) = t_A \left( v_{\alpha_i^p}^{k_i}, v_{\beta_i^p}^{k_i}, h_i^p \right) + t_{TL} \left( h_i^p, 0 \right) + t_{TL} \left( 0, h_j^q \right) + \max \{ t_G \left( v_{\beta_i^p}^{k_i}, v_{\alpha_j^q}^{k_j} \right), r.e \}$	<b>F - DTU</b> : اگر $i \neq j + 1$ و $q \neq p + 1$ باشد و شارژ لازم برای حرکت از $\alpha_i^p$ تا $\beta_i^p$ بیشتر از $k_i - k_i'$ باشد، وزن یال را $\infty$ قرار می‌دهیم. $e = \max \{ 0, k_j - (k_i' - \ \beta_i^p - \alpha_j^q\ _2) \}$

## ۴-۲ الگوریتم

کند که اگر رئوس مجاور، هم‌ارتفاع باشند؛ طبق همسایگی نوع دوم، ابتدا رئوس هم‌ارتفاع و همسایه (مجاور) را رویت می‌کند. برای بررسی این که آیا دو زیرسلول  $c_i^j$  و  $c_j^i$  در  $X$  نزدیکترین همسایگی یکدیگر قرار دارند یا خیر، از بین چهار حالت فاصله اقلیدسی بین پایگاه‌های ورودی و خروجی  $\{\alpha_i^j, \beta_i^j, \alpha_j^i, \beta_j^i\}$  رئوس  $v_i^j$  و  $v_j^i$  ، کمترین فاصله را انتخاب می‌کنیم. سپس الگوریتم ۲، جواب حاصل از GLNS را به جوابی برای مسئله پوشش تعدادی چندضلعی تبدیل می‌کند. دور بهینه به دست آمده از GLNS دوری است که دقیقاً یک رأس از هر دسته را بازدید می‌کند. می‌دانیم که هر دسته مربوط به یک زیرسلول از تقسیم‌بندی خیش‌آهنی می‌باشد. هر یال از دور بهینه را با  $e = (v_i^j(k), v_j^i(k))$  نشان می‌دهیم که  $v_i^j(k)$  رأس ورودی و  $v_j^i(k)$  رأس خروجی آن یال است. سپس به ازای هر یال  $e$ ، رأس مقابل  $v_i^j(k)$  که در یک دسته قرار

پس ابتدا یک گراف می‌سازیم که نمونه‌ای از مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته است و آن را با استفاده از حل‌کننده GLNS حل می‌کنیم.

این حل‌کننده به روش اکتشافی و جستجوی محلی<sup>۸</sup> مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته را حل می‌کند و راه‌حل تقریباً با کمترین هزینه را در زمان کارایی ارائه می‌دهد. الگوریتم ۱ نحوه ساخت گراف ورودی مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته را نشان می‌دهد. الگوریتم ۱ گره‌های گراف ورودی را با توجه به همسایگی اول، طوری ایجاد می‌کند که گره‌های هر همسایگی، یک لایه را شکل می‌دهند و هر لایه با لایه بعدی اشتراک نیز دارند که موجب ایجاد یال‌های اصل لایه‌ها می‌شود. در هر لایه، پهباد ترجیح می‌دهد ابتدا رئوس نزدیک و مجاور را رویت

---

**Algorithm 1. Layered Graph Construction**

---

**Input:** Boustrophedon cell decomposition  $\mathcal{C}$  of all polygons of the environment, For each  $C_i = \{c_i^1, \dots, c_i^m\} \in \mathcal{C}$ , each  $c_i^j$  has a height  $h_i^j$ , Decentralized battery level  $k$ , Neighborhood size  $X$

**Output:** Layered weighted graph  $G = (V, E, w)$

```
1  $G \leftarrow \emptyset$ 
2 for each cell  $C_i \in \mathcal{C}$ :
3   for each subcell  $c_i^j \in C_i$ :
4     Assign two sites  $\alpha_i^j$  and  $\beta_i^j$  on the entries of each subcell  $c_i^j$ 
5     for each battery level  $k$ :
6       Add vertex  $v_i^j(k)$  with  $\alpha_i^j$  coordinate to  $V$ 
7       Add vertex  $v_i^j(k)$  with  $\beta_i^j$  coordinate to  $V$ 
8   LayerNumber  $\leftarrow 0$ 
9   for each  $(v_i^j(k), v_i^{j'}(k')) \in V \times V$ :
10    if  $(j \neq j')$  and  $(v_i^j(k), v_i^{j'}(k'))$  are in their  $X$  nearest neighborhood:
11      Layer LayerNumber  $\leftarrow v_i^j(k), v_i^{j'}(k')$ 
12      Add an edge  $e = \{v_i^j(k), v_i^{j'}(k')\}$  to  $E$ 
13      Calculate weight of  $e$  and record the selected edge type
14      LayerNumber  $+= 1$ 
15 return  $G$ 
```

---

---

**Algorithm 2. Coverage Path Planning**

---

**Input:** Layered Graph  $G = (V, E, w)$

**Output:** Coverage path for UAV

```
1 Path  $\leftarrow \emptyset$ 
2  $T \leftarrow \text{GLNS}(G)$ 
3 for each edge  $e = (v_i^j(k), v_i^{j'}(k'))$  in  $T$ :
4   Replace  $e$  by a new sub-path  $p_e$  from in-node of  $v_i^j(k)$  to its cellmate vertex and from that
   cellmate to the out-node  $v_i^{j'}(k')$  according to the edge type
5   Path  $\leftarrow p_e$ 
6 return Path
```

---

زمانی الگوریتم ۲ نیز برابر با پیچیدگی زمانی الگوریتم حل‌کننده GLNS می‌باشد که یک نوع الگوریتم جستجوی محلی برمبنای روش شبیه‌سازی تبرید<sup>۱۰</sup> است. مسئله GTSP که GLNS حل می‌کند یک مسئله NP-Hard می‌باشد و در الگوریتم جستجوی محلی آن، تعیین زمان قطعی<sup>۱۱</sup> توقف الگوریتم ممکن نیست زیرا تعداد دفعات تکرار یا زمان خاتمه الگوریتم (هنگام رسیدن به بهینه محلی) قطعی نمی‌باشد ولی اسمیت و ایمسون [۲۲] با بررسی سه حالت متفاوت و سه بازه برای تعداد گره‌های درون هر خوشه، سه زمان اجرای  $O(n^2)$ ،  $O(\max\{mn^2, m^3n \log m\})$  و  $O(mn)$  را برای GLNS تحلیل کرده‌اند که در آن  $n$  تعداد

دارند را هم‌سلولی<sup>۹</sup> آن راس می‌نامیم. در نهایت مسیر از  $v_i^j(k)$  به هم‌سلولی آن و سپس از آن هم‌سلولی به  $v_i^{j'}(k')$  را به مسیر پهباد اضافه می‌کنیم. مسیر روبات زمینی نیز بر اساس نوع یال‌های انتخاب‌شده به ترتیب ظهور در دور بهینه جواب مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته، تعیین می‌شود.

پیچیدگی زمانی الگوریتم ۱ که الگوریتم ساخت گراف ورودی GLNS بوده و برابر با اندازه گراف است  $O(Nk) + O(N^2) = O(N^2)$  می‌باشد که  $n$  تعداد کل سلول‌ها و  $N = nm$  تعداد کل زیرسلول‌ها و  $k$  تعداد سطوح گسسته‌شده باتری پهباد (عددی ثابت) می‌باشد. پیچیدگی

10- Simulated Annealing  
11- Deterministic

9-Cellmate

کل رؤوس و  $m$  تعداد خوشه‌ها است. جهت آشنایی بیشتر با جزییات الگوریتم حل GLNS به [۲۲] مراجعه نمایید.

### ۵. آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی نتایج به‌دست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم و بررسی چند پارامتر موثر در حل مسئله می‌پردازیم. ما آزمایش‌های این بخش را بر روی یک رایانه با سیستم عامل اوبونتو ۲۰،۰۴ با پردازنده ۴ هسته‌ای ۲،۲ گیگاهرتز و ۶ گیگابایت حافظه اجرا کرده‌ایم. در بخش ۵،۱ با در نظر گرفتن ارتفاع به بررسی کیفیت مسیرها در مقایسه با حالت بدون ارتفاع، در بخش ۵،۲ به آزمایش درصد پوشش محیط، در بخش ۵،۳ به بررسی بازه مناسب برای مقدار پارامتر  $D_{max}$ ، در بخش ۵،۳ به آزمایش تاثیر تغییرات نرخ مصرف باتری بر هزینه و زمان اجرای الگوریتم و در بخش ۵،۴ به بررسی کاهش گراف ورودی مسئله نیز پرداخته‌ایم.

#### ۵-۱ تغییرات ارتفاع

ما از چندضلعی‌های شکل ۱-الف به‌عنوان محیط ورودی مسئله استفاده کرده‌ایم. پارامترهای ورودی مسئله را به صورت  $D_{max} = 500, r = 2, t_{TL} = 45, t_{TO} = 5$  و  $C = 20$  و سرعت روبات زمینی را  $1/5$  سرعت پهپاد در نظر گرفته‌ایم. در شکل ۱-ب نمونه‌ای از مسیر حرکت پهپاد را می‌بینید. در اینجا هزینه مسیر حرکت پهپاد ۱۱۵۹ به‌دست آمده است درحالی‌که بدون در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع، هزینه مسیر پهپاد ۱۰۸۱ بوده است. در این آزمایش‌ها دریافتیم که پهپاد تمایل دارد ابتدا نقاط هم‌ارتفاع و نزدیک به یکدیگر را طی کند و مگر در صورت اجبار، تمایلی برای تغییر ارتفاع ندارد.

#### ۵-۲ درصد پوشش محیط

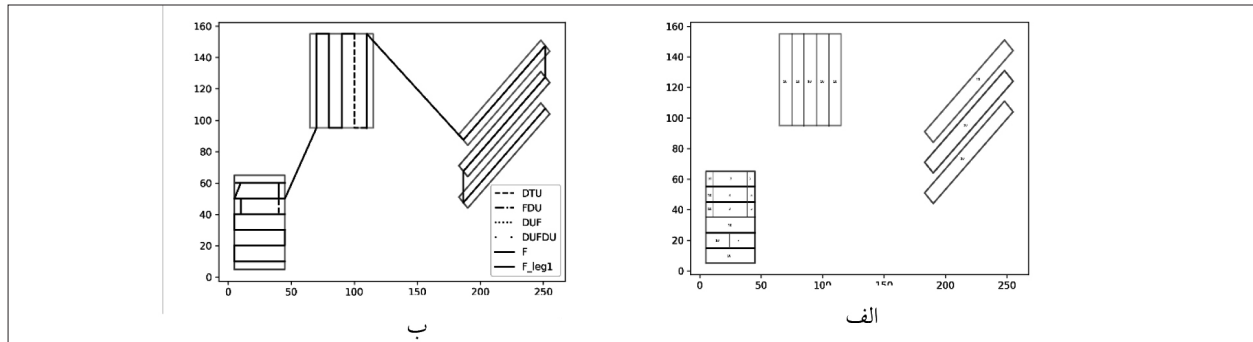
برای اندازه‌گیری میزان پوشش محیط آزمایشی طراحی کردیم که در آن دو نوع پوشش با تغییر ارتفاع و عدم تغییر ارتفاع را در نظر گرفتیم. در هر دو حالت، محیط ورودی

یکسان و تمامی پارامترها را یکسان قرار دادیم. در حالت ارتفاع ثابت از آنجایی‌که یک ارتفاع برای کل محیط انتخاب می‌شود، مجبور هستیم برای اجتناب از برخورد با موانع در بالاترین ارتفاع امن از محیط پرواز کنیم. حال فرض می‌کنیم که تمامی ارتفاع‌های داده شده حالت یکنوا داشته باشند بجز یک سلول که دارای ارتفاع ۱۰ برابر سلول‌های دیگر باشد. به‌طور دقیق‌تر همه سلول‌ها دارای ارتفاع ۲ تا ۱۰ هستند بجز سلولی که در ارتفاع ۱۰۰ قرار دارد. از آنجایی‌که انرژی مصرفی پهپاد با ارتفاع پرواز رابطه مستقیم دارد [۴]، بنابراین برای میزان مصرف انرژی پهپاد در ارتفاع ۱۰۰ متری، ضریبی نسبت به ارتفاع را در نظر گرفتیم. با در نظر نگرفتن تغییرات ارتفاع پرواز، علاوه بر این که پهپاد در هنگام پرواز، شارژ بیشتری مصرف کرد و برای شارژ شدن مسافت بیشتری را در صعود و فرود طی کرد، تنها یک سلول را پوشش موثر داد. شکل ۲-ب مسیر حرکت پهپاد با در نظر گرفتن ارتفاع هر سلول و با مقادیر  $D_{max} = 600$  و  $k = 10$  را نشان می‌دهد. هزینه مسیر خروجی برابر با ۱۱۱۲ بوده و تمامی محیط پوشش داده شده است. این درحالیست که شکل ۲-الف مسیر حرکت پهپاد در ارتفاع ۱۰۰ و با مقادیر  $D_{max} = 600$  و  $k = 10$  را نشان می‌دهد؛ در این حالت، هزینه مسیر خروجی برابر با ۱۳۱۳ بوده و فقط ۲،۴۷ درصد کل مساحت چندضلعی‌ها پوشش داده شده است.

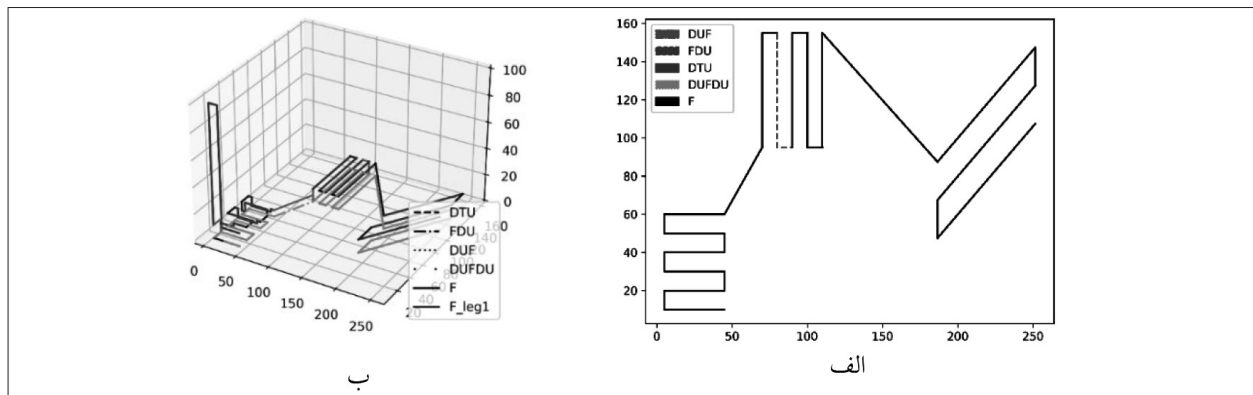
#### ۵-۳ مناسب‌ترین بازه برای بیشترین مسافت

##### حرکت پهپاد نسبت به هزینه مصرفی در یک دور

$D_{max}$  مسافت قابل‌پیمایش توسط پهپاد با ظرفیت باتری کامل آن می‌باشد. در بعضی از پهپادها قابلیت ارتقای باتری وجود دارد و از طرفی یک پهپاد برای پوشش یک محیط مناسب‌تر از پهپاد دیگر از نظر میزان شارژ آن‌ها است. با این توضیحات به محاسبه بازه‌ای مناسب برای  $D_{max}$  می‌پردازیم. فرض کنید طول بزرگ‌ترین سلولی که پهپاد باید در ارتفاع مشخص از آن پرواز کند تا آن را پوشش دهد  $M$  باشد. ایده‌آل‌ترین حالت مصرف انرژی در



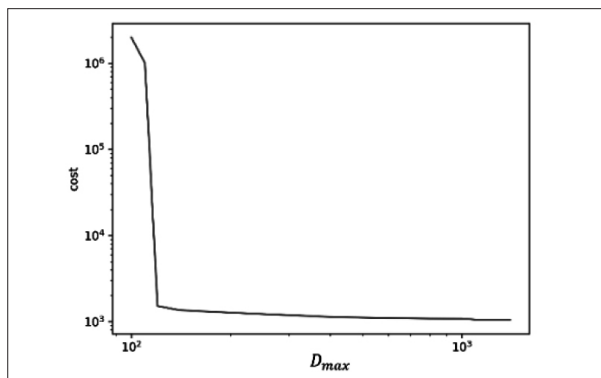
شکل ۱: الف - چندضلعی‌های محیط ورودی با ارتفاعات متفاوت در زیرسلول‌ها. ب - مسیر پهپاد با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع زیرسلول‌ها



شکل ۲: الف - مسیر حرکت پهپاد در ارتفاع ۱۰۰ متری. ب - مسیر حرکت سه‌بعدی پهپاد با در نظر گرفتن ارتفاع هر سلول

تغییر ارتفاع زیرسلول‌ها را در نظر می‌گیریم، مقدار  $M$  برابر خواهد بود با ماکزیمم مجموع طول زیرسلولی که پهپاد در ارتفاع مشخص از آن پرواز می‌کند و مسافتی که پهپاد از روی زمین به ارتفاع مشخص آن سلول می‌رسد که آن را با معادله  $M = \max_{i,j} \{|\alpha_i^j - \beta_i^j|_2 + h_i^j\}$  نشان می‌دهیم. آزمایش قبل را با در نظر گرفتن تغییر ارتفاعات محیط نیز تکرار کردیم و همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید، بهینه‌شدن هزینه دور با در نظر گرفتن ارتفاع در  $D_{max} = 120$  اتفاق افتاده است و در حالت بدون تغییر ارتفاع در شکل ۳، بهینه‌شدن هزینه دور در  $D_{max} = 111$  اتفاق افتاده است. این تفاوت به دلیل در نظر گرفتن مسافت صعود پهپاد به ارتفاع طولانی‌ترین زیرسلول به وجود آمده است. در ابتدای بازه بهینه  $D_{max}$  یعنی در  $D_{max} = 111$  کاهش چشمگیری در هزینه مسیر دیده می‌شود و در انتهای بازه یعنی  $D_{max} = 1110$  به بهینه‌ترین مقدار هزینه می‌رسیم.

طول یک مسیر از یک پایگاه به پایگاه دیگر این است که در حرکت از یک گره به گره دیگر صرفاً به اندازه یک واحد از شارژ گسسته شده باتری ( $k$ ) مصرف کنیم. بنابراین باید طول مسیر یک سلول بیشتر یا مساوی مسافتی باشد که پهپاد با یک واحد  $k$  توانایی پیمودن آن را دارد. یعنی  $M \geq \frac{D_{max}}{k}$  باشد. از طرفی  $D_{max}$  باید به اندازه‌ای باشد که پهپاد، یک سلول را با شارژ کامل بتواند بپوشاند. یعنی  $M \leq D_{max}$  باشد که در نتیجه، بازه مناسب برای  $D_{max}$  به صورت  $(M, kM)$  می‌باشد. در این آزمایش با توجه به بازه به دست آمده،  $D_{max}$  را با مقدار اندکی بیشتر از مقادیر بازه به عنوان ورودی به الگوریتم داده و مقادیر هزینه به دست آمده را در نمودار شکل ۳ نمایش داده‌ایم. مقادیر  $M = 98.5$  و  $k = 10$  را در نظر گرفتیم. در ابتدای بازه بهینه  $D_{max}$  (یعنی در  $D_{max} = 99$ ) کاهش چشمگیری در هزینه مسیر مشاهده می‌شود. از طرف دیگر در انتهای بازه یعنی  $D_{max} = 990$  در بهینه‌ترین مقدار هزینه قرار داریم. توجه داشته باشید، هنگامی که



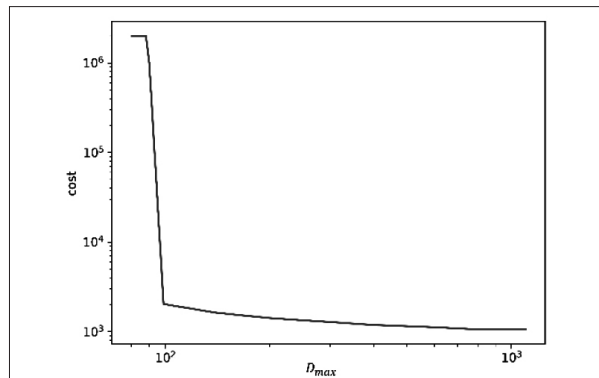
شکل ۲: نسبت بیشترین مسافت قابل پی مایش توسط پهپاد به هزینه مسیر بهینه پهپاد با در نظر گرفتن ارتفاع سلول‌ها

همان‌طور که می‌بینید پهپاد در حالت  $k = 2$  در انتهای هر پایگاه شارژ می‌شود ولی تعداد دفعات شارژ شدن پهپاد با افزایش مقدار  $k$  کاهش یافته است. این نکته قابل توجه است که با بالا رفتن تعداد گره‌ها و به دنبال آن تعداد یال‌ها، حل‌کننده GLNS همواره جواب بهینه‌تری را به ما نمی‌دهد. این نتیجه در شکل ۵-ب برای  $k > 10$  نیز قابل مشاهده است.

### ۵-۵ کاهش گراف

باتوجه به نحوه ساخت گراف ورودی در بخش ۴،۱، ساخت گراف تقریباً کامل در افزایش زمان اجرای الگوریتم‌های قبلی بسیار موثر بود. در نتیجه، ما برای کاهش یال‌های گراف،  $X$  تا نزدیک‌ترین سلول به هر سلول  $i$  را می‌یابیم و تنها از سلول  $i$  به آن  $X$  سلول، یال ایجاد می‌کنیم. فرض کنید  $X = 5$  باشد. در این صورت ۵ نزدیک‌ترین سلول به سلول  $i$  را محاسبه کرده و از  $i$  به آن‌ها یال قرار می‌دهیم.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، با افزایش تعداد رئوس گراف، زمان اجرا شبیه به تابع نمایی رفتار می‌کند. با کاهش تعداد رئوس گراف، شیب نمودار کمتر شده و سرعت اجرای الگوریتم بهبود یافته است. همچنین، نسبت هزینه مسیر برای گراف کامل و گراف کاهش یافته نزدیک به هم بوده و گراف کاهش یافته، مسیرهای نسبتاً مشابه قبل را می‌دهد. نمونه‌ای از مسیر حرکت پهپاد با گراف کاهش یافته با  $X = 5$  را در شکل ۶ می‌بینید.

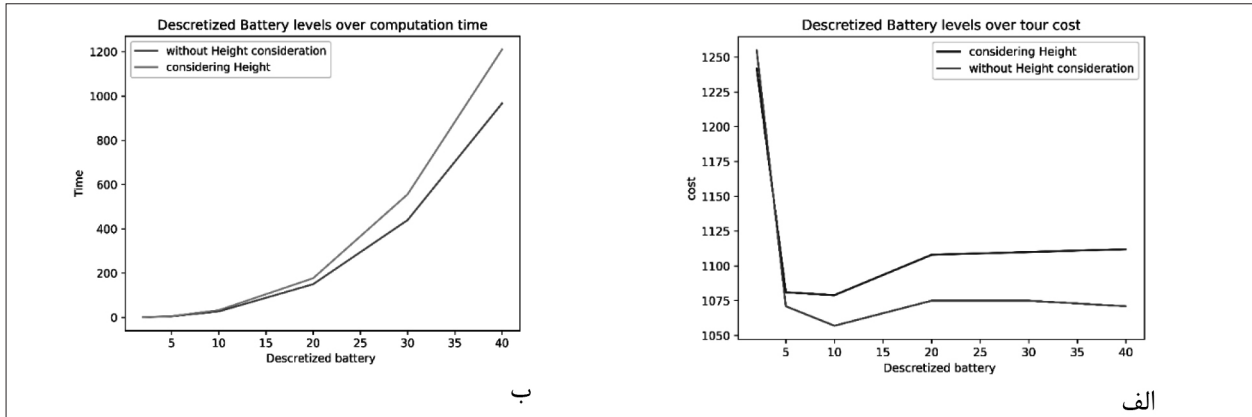


شکل ۱: نسبت بیشترین مسافت قابل پی مایش به هزینه مسیر بهینه

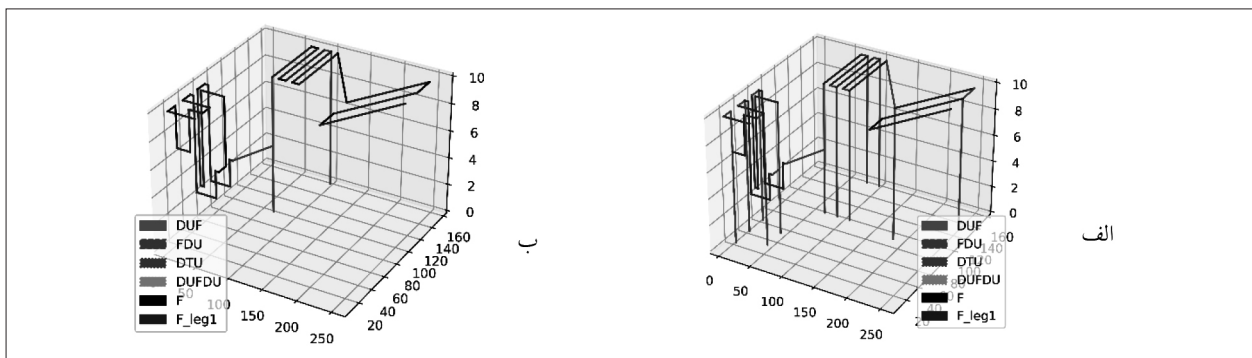
### ۵-۴ تغییر در نرخ مصرف باتری

گاهی اوقات، امکان تغییر پهپاد برای دستیابی به شارژ بیشتر یا امکان ارتقا باتری پهپاد وجود ندارد، در این صورت توجه به تغییرات نرخ مصرف باتری که آن را با  $k$  نشان می‌دهیم (گسسته‌سازی باتری به  $k$  واحد) مفید خواهد بود. هنگام حرکت پهپاد، از رأس یک سلول به رأسی دیگر در سلولی دیگر، حداقل  $k$  واحد انرژی نیاز است. تعداد گره‌های گراف مستقیماً به مقدار  $k$  وابسته است. در نتیجه زمان اجرای الگوریتم با بالا رفتن مقدار  $k$  افزایش می‌یابد. در شکل ۵ می‌توان افزایش زمان اجرای الگوریتم و هزینه را به ازای افزایش مقدار  $k$  دید. با افزایش  $k$  و به دنبال آن افزایش تعداد گره‌ها و بزرگ‌تر شدن گراف با این که زمان اجرای الگوریتم بالا می‌رود، مسئله به دنیای واقعی مصرف شارژ باتری نزدیک‌تر می‌شود. این در حالی است که وقتی پهپاد از یک پایگاه به پایگاه دیگر می‌رود، ممکن است انرژی کمتر از یک واحد  $k$  مصرف کند. برای مثال، وقتی  $k = 4$  باشد، یعنی با هر بار حرکت از یک پایگاه به پایگاه دیگر حداقل  $\frac{1}{4}$  انرژی کل پهپاد مصرف می‌شود ولی ممکن است که پهپاد برای این حرکت، تنها به  $\frac{1}{8}$  انرژی کل نیاز داشته باشد. بنابراین با فرض  $k = 10$  خطای کمتری خواهیم داشت. با افزایش این خطا، پهپاد نیاز به شارژ بیشتری دارد و به دنبال آن هزینه بیشتری خواهد داشت. به همین دلیل، هزینه مسیر حرکت پهپاد در حالتی که  $k = 10$  باشد نسبت به حالت  $k = 2$  کمتر می‌شود. در شکل ۴ نمونه‌هایی از حرکت پهپاد با  $k = 2$  و  $k = 10$  را مشاهده می‌کنید.

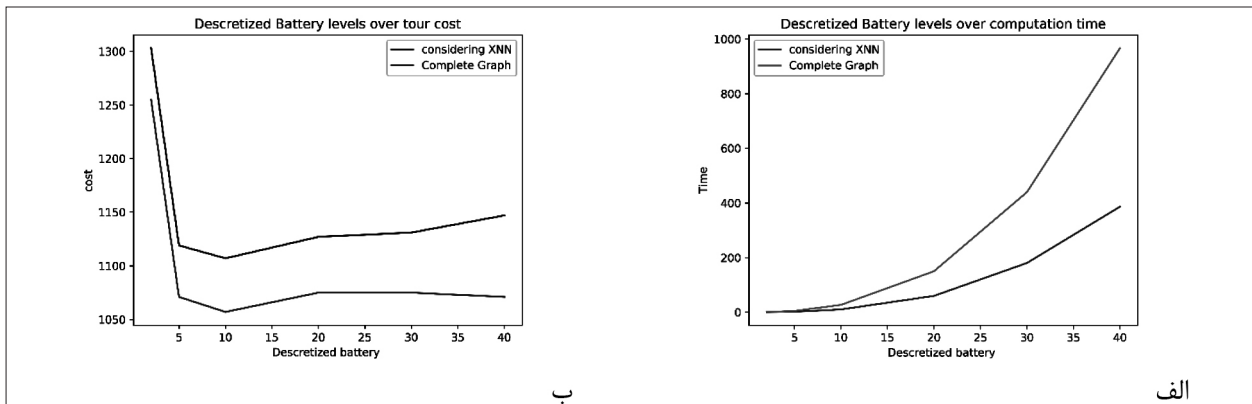




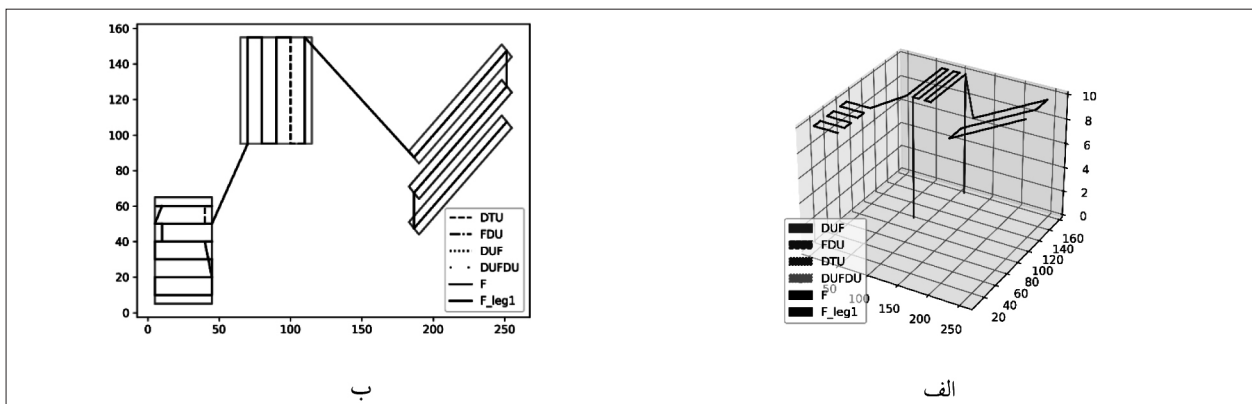
شکل ۳: الف- نسبت تغییرات گسسته سازی باتری به هزینه مسیر پهباد، ب- نسبت تغییرات گسسته سازی باتری به زمان اجرای الگوریتم



شکل ۴: مسیر حرکت پهباد الف- اگر  $k=2$  باشد. ب- اگر  $k=10$  باشد.



شکل ۵: الف- نسبت زمان اجرای الگوریتم در دو گراف کاهش یافته و غیرکاهش یافته به افزایش مقدار گسسته سازی باتری (افزایش تعداد رئوس)، ب- نسبت هزینه مسیر پهباد در دو گراف کاهش یافته و غیرکاهش یافته به افزایش مقدار گسسته سازی باتری (افزایش تعداد رئوس)



شکل ۶: الف- نمونه ای از مسیر پهباد با کاهش گراف و بدون تغییر ارتفاع، ب- نمونه ای از مسیر پهباد با کاهش گراف و تغییر ارتفاع

ما در این مقاله برای پوشش محیط‌های کشاورزی با ارتفاعات متفاوت از یک پهپاد و یک ربات زمینی به‌عنوان شارژکننده سیار یا ایستای پهپاد استفاده کرده‌ایم. در ابتدا محیط را به‌صورت خیش‌آهنی تقسیم‌بندی کرده و سپس عملیات پوشش توسط پهپاد در هر زیرسلول با ارتفاعات متفاوت را در نظر گرفتیم و برای آن گرافی ساختیم. مسئله پوشش را به مسئله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته تبدیل کردیم و گراف نظیر آن را به‌عنوان ورودی به حل‌کننده اکتشافی GLNS دادیم و دوری در گراف پیدا کردیم که متناظر با مسیر حرکت پهپاد و پوشش محیط است. نتایج الگوریتم را با تعدادی آزمایش بررسی و تحلیل کردیم. در ادامه این مقاله برای کارهای آتی پیشنهاد می‌شود پارامترهای مختلف محیطی مانند محدودیت حرکت ربات زمینی یا باد، شیب زمین، بازتاب نور، نوع زمین نیز مورد بررسی قرار گیرند. همچنین می‌توان زاویه چرخش پهپاد را به‌عنوان یک محدودیت در مسیریابی پهپاد مورد بررسی قرار داد و یا انرژی ربات زمینی را محدود در نظر گرفته و انرژی مصرفی آن در انواع زمین‌ها را بررسی کرده تا بتواند مسیرهای بهتری را طی کند و از پهپاد پشتیبانی کند.

#### مراجع

- [1] Pratap Rajkumar Tokekar. Placement and Motion Planning Algorithms for Robotic Sensing Systems. PhD thesis, University of Minnesota, 2014.
- [2] He Li, Yujing He, Chaobin Qin, Daoqi Liu, and Kaifei Zhang. Ecological analysis on spray performance of multi-rotor unmanned aerial sprayer in soybean field. *Ekoloji*, 28(107):4573–4579, 2019.
- [3] Weicai Qin, Xinyu Xue, Lixin Zhou, Songchao Zhang, Zhu Sun, Wei Kong, and Baokun Wang. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(5):50–56, 2014.
- [4] Juan Augusto Paredes, Carlos Saito, Monica Abarca, and Francisco Cuellar. Study of effects of high-altitude environments on multicopter and fixed-wing uavs' energy consumption and flight time. In 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pages 1645–1650, 2017.
- [5] Kevin Yu, Jason M O'Kane, and Pratap Tokekar. Coverage of an environment using energy-constrained unmanned aerial vehicles. In IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), pages 3259–3265, 2019.
- [6] Cheng, Peng, James Keller, and Vijay Kumar. "Time-optimal UAV trajectory planning for 3D urban structure coverage." In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2750-2757, 2008.
- [7] Ahmad, Z., Ullah, F., Tran, C. and Lee, S., Efficient energy flight path planning algorithm using 3-d visibility roadmap for small unmanned aerial vehicle. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017.
- [8] Nikolaos Stefas, Patrick A Plonski, and Volkan Isler. Approximation algorithms for tours of orientation-varying view cones. *The International Journal of Robotics Research*, 39(4):389–401, 2020.
- [9] Parikshit Maini, Pratap Tokekar, and PB Sujit. Visual monitoring of points of interest on a 2.5 d terrain using a uav with limited field-of-view constraint. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 3661–3672, 57(6), 2021.
- [10] Peng C, Isler V. Visual coverage path planning for urban environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 5961-5968, 2020.
- [11] Zhangjie Fu, Jingnan Yu, Guowu Xie, Yiming Chen, and Yuanhang Mao. A heuristic evolutionary algorithm of uav path planning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.
- [12] Chenxi Huang, Yisha Lan, Yuchen Liu, Wen Zhou, Hongbin Pei, Longzhi Yang, Yongqiang Cheng, Yongtao Hao, and Yonghong Peng. A new dynamic path planning approach for unmanned aerial vehicles. *Complexity*, 2018.
- [13] Christian Zammit and Erik-Jan Van Kampen. Comparison between a\* and rrt algorithms for uav path planning. In AIAA guidance, navigation, and control conference, page 1846, 2018.
- [14] Derek Mitchell, Ellen A Cappo, and Nathan Michael. Persistent robot formation flight via online substitution. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 4810–4815, 2016.
- [15] Shaimaa Ahmed, Amr Mohamed, Khaled Harras, Mohamed Kholief, and Saleh Mesbah. Energy efficient path planning techniques for uav-based systems with space discretization. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pages 1–6, 2016.
- [16] Xin Yu, Thaddeus A Roppel, and John Y Hung. An optimization approach for planning robotic field coverage. In IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pages 004032–004039, 2015.
- [17] Jeremy S Lewis, William Edwards, Kelly Benson, Ioannis Rekleitis, and Jason M O'Kane. Semi-boustrophedon coverage with a dubins vehicle. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 5630–5637, 2017.
- [18] Pratap Tokekar, Joshua Vander Hook, David Mulla, and Volkan Isler. Sensor planning for a symbiotic uav and ugv system for precision agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6):1498–1511, 2016.
- [19] Kevin Yu, Ashish Kumar Budhiraja, Spencer Buebel, and Pratap Tokekar. Algorithms and experiments on routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations. *Journal of Field Robotics*, 36(3):602–616, 2019.
- [20] Howie Choset and Philippe Pignon. Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition. In *Field and service robotics*, pages 203–209. Springer, 1998.
- [21] Enric Galceran and Marc Carreras. A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous systems*, 61(12):1258–1276, 2013.
- [22] Smith, Stephen L., and Frank Imeson. GLNS: An effective large neighborhood search heuristic for the generalized traveling salesman problem. *Computers & Operations Research* 87: 1-19, 2017.