نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سال ۱۴۰۲ / دوره پاییز و زمستان /شماره ۲ /صفحه ۱۱۱-۱۲۵

DOI: 10.22034/STME.2024.446876.1057

مسیریابی برای ربات‌های پرنده بدون سرنشین در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان خرید کالاهای اینترنتی

عرفان خسرویان*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

با توجه به رشد روزافزون تجارت جهانی و ضرورت تحویل سریع سفارش‌ها در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان خرید کالاهای اینترنتی، نیاز به حمل‌ونقل هوایی بار در مقابل روش‌های توزیع جاری (زمینی و دریایی) بیش از پیش احساس می‌شود؛ به‌طوری‌که طی سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به این حوزه شده است. یکی از چالش‌های موجود در یک شبکه توزیع هوایی مسئله مسیریابی برای ربات‌های بدون سرنشین با در نظر گرفتن افزایش رضایت مشتریان و محدودیت‌های شبکه و مشتریان می‌باشد. برای نیل به این هدف در این مقاله ابتدا مسئله مسیریابی و محدودیت‌های مشتری و شبکه مطرح و به‌صورت ریاضیاتی فرموله گردید. باید اشاره داشت که دینامیک ربات هوایی یکی از محدودیت‌های اصلی مسئله می‌باشد و تاکنون در پژوهش‌های ارائه شده از مسئله مسیریابی در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان مورد توجه قرار نگرفته و مهجور مانده است (علت امر نیز دخیلی شدن معادلات دینامیکی-سینماتیکی پرنده و به تبع دشوار و پیچیده شدن مسئله می‌باشد). این در حالی است که در این مقاله معادلات غیرخطی ربات هوایی جهت سرویس‌دهی به مشتریان به فرم فضای حالت بیان شد. سپس مسئله مسیریابی با در نظر گرفتن معادلات فرم فضای حالت ربات‌های پرنده و محدودیت‌های مشتریان و شبکه با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (حل‌گر بهینه‌ساز) حل گردید. پس از بیان روابط و حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک، نتایج در قالب مسیرهای بهینه ارائه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد رویکرد پیشنهادی به‌خوبی توانسته کلیه نیازهای و اهداف مسئله را پاسخ دهد و می‌توان از آن در مسئله مسیریابی شبکه‌های هوایی با ابعاد بالا نیز بهره گرفت.

کلمات کلیدی

مسیریابی، ربات هوایی، معادلات فضای حالت، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان

Routing for unmanned flying robots in expedited order delivery within distribution networks and online customer service platforms

Erfan Khosraviyan*

Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Astract

Amidst the continuous expansion of global commerce and the urgent need for expedited order delivery within distribution networks and online customer service platforms, the demand for air cargo transportation has reached unprecedented levels, complementing traditional distribution channels such as land and sea. Consequently, this sector has garnered considerable attention in recent years. One of the primary challenges encountered in aerial distribution networks pertains to the routing problem for unmanned aerial vehicles (UAVs), which necessitates considerations of enhanced customer satisfaction and network constraints. To address this challenge, this paper commences by introducing the routing problem alongside customer and network constraints, subsequently presenting their mathematical formulations. Notably, the dynamic behavior of aerial robots poses a significant constraint in this context, which has been inadequately addressed in existing research on routing problems within distribution and customer service networks. This deficiency is attributed to the involvement of flight dynamics equations, complicating the problem significantly. In this study, the nonlinear equations governing aerial robots for customer service are reformulated in state space representation. Subsequently, the routing problem, incorporating the state space equations of flying robots and considerations of customer and network constraints, is tackled using a genetic optimization algorithm—an optimal solver. Following the solution process using the genetic algorithm, the results are elucidated in terms of optimal routes. Simulation outcomes validate the efficacy of the proposed approach in meeting all problem requirements and objectives, thereby presenting a viable solution for routing large-scale aerial networks.

Keyword

Routing, Aerial robot, State space equations, Genetic optimization algorithm, Distribution network and customer service

*عرفان خسرویان، erfankhosravian@pnu.ac.ir

۱-مقدمه

امروزه با توجه به رشد تجارت جهانی و ضرورت تحویل سریع سفارش‌ها، نیاز به حمل‌ونقل هوایی بار بیش از پیش احساس می‌شود؛ به‌طوری‌که طی سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به این حوزه شده است. در حال حاضر پرنده‌های بدون سرنشین به‌ویژه عمودپروازها نظیر کوادروتورها به دلیل سریع بودن و داشتن انعطاف در برنامه‌ریزی مسیر، وسایل کارایی برای بخش سرویس‌دهی و حمل‌ونقل می‌باشند؛ بنابراین می‌توان از این وسایل برای حمل‌ونقل محموله‌های سبک وزن در بسیاری از صنایع، از جمله در فروشگاه‌های اینترنتی، استفاده نمود. لازم به ذکر است که یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین عناصر در بهره‌وری و سودآوری در زنجیره تأمین در فروشگاه‌های اینترنتی، به‌کارگیری از یک شبکه توزیع سریع و مناسب است. بدین‌صورت که شبکه قادر باشد اهدافی نظیر کمینه کردن هزینه‌ها و تأمین سطح رضایت مشتریان را برآورده سازد. حال آنکه در یک شبکه توزیع، مواردی نظیر مسیریابی و هماهنگی بین وسایل نقلیه، تعیین الویت برای سرویس‌دهی به مشتریان و افزایش رضایت مشتریان از چالش‌های موجود در حوزه هستند که در سال‌های اخیر توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است.

همان‌طور که اشاره شد یکی از چالش‌های موجود دریک شبکه توزیع افزایش رضایت مشتریان می‌باشد زیرا در دنیای رقابتی امروز با فراگیر شدن فلسفه تولید به هنگام، ارائه خدمات در ظرف زمانی مدنظر کارفرما اهمیت به سزایی پیدا کرده است. لذا تخطی از محدوده زمانی مدنظر کارفرما، هزینه‌های اضافی ناشی از دیرکرد و یا زودکرد را به سیستم تحمیل خواهد کرد؛ بنابراین در نظر گرفتن ظرف زمانی موردنظر کارفرما و لحاظ کردن هزینه‌های ناشی از عدم تحویل به‌موقع در مسئله مسیریابی، می‌تواند تصویر بهتری از واقعیت مسئله را ارائه کرده و منجر به دست‌یابی به راه‌حل‌های مؤثرتر (کاربردی‌تر) گردد.

مسئله مسیریابی برای ربات‌های بدون سرنشین به مسئله‌ای اطلاق می‌شود که در آن یک ناوگان متشکل از چندین ربات پرنده از یک یا چند ترمینال یا انبار به ارائه خدمت به مجموعه‌ای از مشتریان مستقر در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند که هر یک دارای تقاضای معینی می‌باشد و این امر را به نحوی انجام می‌دهند که هزینه‌های انجام این کار به حداقل برسد. در فرایند سرویس‌دهی در طول مسیر هر یک از مشتریان تنها یک بار ملاقات می‌شود و تقاضای هر از مشتریان تنها توسط یک پرنده پاسخ داده می‌شود. بدین‌صورت که پرنده باید کالاها را از مبادی مشخصی به نام دپو یا انبار جمع‌آوری کرده و به مقاصد موردنظر منتقل نماید. به‌بیان‌دیگر این مسئله شامل مجموعه‌ای از مشتری‌ها می‌باشد که تقاضای تحویل و برداشت مرتبط با این مشتری‌ها باید برآورده گردد.

با توجه به مقالات، کتب و تحقیقات ارائه‌شده مسئله مسیریابی می‌تواند بر اساس حوزه کاربری هوایی، زمینی، دریایی و زیرسطحی، فرض‌های بکار گرفته‌شده در مدل‌سازی، روش حل و غیره مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش سعی داریم تا با رویکردی متفاوت و از منظر مدل‌سازی و روش حل، به بررسی مطالعات در حوزه مسیریابی بپردازیم تا زمینه‌های توسعه برای مطالعات آتی فرا روی پژوهشگران قرا گیرد. نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد هنوز جنبه‌های بسیاری برای توسعه و بهبود مسئله مسیریابی در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان خرید کالاهای اینترنتی وجود دارد که به دلیل ماهیت نسبتاً پیچیده آن‌ها کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است لذا راه برای مطالعه و بررسی در این حوزه باز است.

مسئله مسیریابی برای وسایل نقلیه باحالت مخفف VRP[۱] یکی از مسائل مبتنی بر بهینه‌سازی است که در برخی مواد یک مسئله ترکیبی بسیار پیچیده می‌باشد که بیش از ۶ دهه قبل تعریف‌شده است. در یک مسئله مسیریابی هدف تعیین و طراحی مجموعه‌ای از مسیرها برای یک یا چندین مجموعه وسیله نقلیه است که باید به مجموعه‌ای از مشتریان که داری تقاضاهای مشخص و معلوم می‌باشند خدمات‌رسانی شود به‌نحوی‌که با رعایت قیدهای مسئله، تابع معیار کمینه گردد. این تابع می‌تواند

۱ Vehicle Routing Problem (VRP)

زمان مسافرت، هزینه کل شامل (هزینه‌های متغیر وسایل نقلیه، هزینه‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های ثابت)، تعداد وسایل نقلیه، مسافت و ترکیبی از این‌ها باشد. باید متذکر شویم که هر یک از وسایل نقلیه دارای ظرفیت بار مشخص و محدود می‌باشد. به بیانی دیگر با توجه به فیزیک و نیاز مسئله وسایل نقلیه می‌توانند همگن و یا ناهمگن باشند. همچنین فرض می‌شود که هر یک از وسایل نقلیه باید مسیر خود را از انبار شروع کنند و به انبار ختم نمایند

با توجه به مقالات و منابع می‌توان بیان داشت که ایده اولیه مسئله مسیریابی برای وسایل نقلیه توسط دانتسیگ و رامسر[۱] در سال ۱۹۵۹ میلادی در قالب مسئله [۱]، برای مسیریابی کامیون‌های گازوئیل از پایانه سوخت‌رسانی به ایستگاه‌های متقاضی گازوئیل، مطرح‌شده است. ایشان نشان دادند که به‌کارگیری روش‌های مدیریتی و مباحث بهینه‌سازی در حوزه حمل‌ونقل تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های مربوط به کالا دارد. از آن زمان به بعد حالت‌های مختلفی از مسئله مذکور موردمطالعه قرارگرفته و روش‌ها و الگوریتم‌های متنوعی برای آن ارائه‌شده است که از آن جمله می‌توان به مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی VRPTW[۲]، مسیریابی وسایل نقلیه با قید ظرفیت CVRP[۳]، شکل پویای مسیریابی وسایل نقلیه DVRP[۴] شکل تصادفی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه SVRP[۵]، مسیریابی وسایل نقلیه با مسیرهای باز OVRP[۶] و غیره اشاره کرد [۳-۲].

با گسترش کاربرد مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در حوزه‌های مختلف، محدودیت‌ها و مفروضاتی به این مسئله اضافه شد که منجر به پیدایش انواع متفاوتی از این مسئله گردیده است. ازجمله فعالیت‌هایی که در این حوزه مطرح است می‌توان به تحقیق درور و همکارانش[۷] اشاره داشت [۴]. در پژوهش ایشان هر مشتری اجازه دارد توسط وسایل نقلیه متفاوت سرویس‌دهی شود درحالی‌که در مسئله مسیریابی کلاسیک هر مشتری تنها یک‌بار و توسط یک وسیله نقلیه قابل ملاقات بود.

از دیگر فعالیت‌های صورت گرفته در حوزه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، می‌توان به کتاب ویرایش یافته توسط توث و ویگو[۸] اشاره داشت [۵] که در آن برخی از حالت‌های کاربردی مسئله مسیریابی مطرح و رویکردهای حل مسئله ارائه شده است.

حالتی از مسئله مسیریابی که امروزه و در دنیای واقعی به‌شدت موردتوجه می‌باشد مسئله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی و همچنین فرمول سازی برخی از حالت‌های مختلف مسئله مسیریابی است که توسط کوردو و همکارانش[۹] مطرح و حل شد [۶].

باید متذکر شویم که ادامه بررسی روند توسعه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه می‌توان از دیدگاه‌های صورت گرفته برای حل آن نام برد، چراکه در دوره‌های زمانی مختلف، از ابتدای طرح مسئله مسیریابی تا به امروز، محققان بسیاری، ایده‌های متفاوتی را برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با روش‌های گوناگون مطرح نموده‌اند که هر یک منجر به افزایش کیفیت جواب و کاهش زمان حل، شده است [۸-۷].

امروزه وسایل هوایی بدون سرنشین به دلیل کاربردها و قابلیت‌هایشان به نحو چشمگیری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کوداروتور بدون سرنشین، یک نمونه بالگرد است که مکانیزم پروازی آن از چرخش چهار موتور و پروانه که در چهار طرف قاب اصلی آن قرار دارند، حاصل می‌شود. کاربردهای کوادروتورها سبب علاقه‌مندی هر چه بیشتر برای پژوهش و توسعه‌ی روز افزون آن‌ها شده است. از جمله این کاربردها، تصویر برداری‌های هوایی، برداشتن اجسام و جابه‌جا کردن آن‌ها، با در نظر گرفتن گیرش‌های مختلف برای انجام این کار، می‌باشد [۱۰-۹].

در سال‌های اخیر بسیاری از مجموعه‌ها و شرکت‌های بزرگ جهانی در حال بررسی و آنالیز شرایطی هستند که بتوانند بسته‌ها، نامه‌ها و سفارشات کاربران را به کمک کوادروتورها در محل به

۱ Dantzig and Ramser (1959)
۲ Vehicle Routing Problem with Time Window.
۳ Capacitated Vehicle Routing Problem.
٤ Dynamic Vehicle Routing Problem.
٥ Stovhastic Vehicle Routing Problem.
٦ Open source vehicle routing problem
٧ Trudeau, et al.
٨ Toth, P. & Vigo, D.
٩ Cordeau,etal

کاربران تحویل دهند. به‌عنوان‌مثال مدیریت شرکت آمازون از این طرح رونمایی کرده است. شرکت‌هایی نظیر DHL و TNT نیز برای ابراز وجود از این طرح حمایت کرده و تمایل خود را برای ارسال سفارشات زیر دو کیلوگرم به مشتریان توسط پهبادها اعلام کرده‌اند. پیش‌بینی می‌شود بسیاری از فروشگاه‌ها و مراکز تجاری در آینده‌ای نه چندان دور به کمک مولتی روتورها بسته‌های کاربران را به آنان تحویل دهند.

هر یک از مولتی روتورها دارای ویژگی‌های خاص خود است و به‌منظور دست‌یابی به اهداف خاصی طراحی می‌شود. مدت‌زمان پرواز یکی از همین ویژگی‌هاست که در هر مولتی روتوری متفاوت است و بسیاری از کاربران نیز آن را اولویت اصلی خود می‌دانند؛ بنابراین یکی از اصلی‌ترین پارامترهایی که در مسیریابی برای ربات‌های پرنده بدون سرنشین در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی باید در نظر گرفت میزان مصرف انرژی موردنیاز برای سرویس‌دهی می‌باشد لذا در این مقاله قصد داریم تا با اعمال محدودیت میزان مصرف انرژی و اعمال آن در مدل‌سازی رویه جدیدی را در مسئله مسیریابی برای پرنده‌های بدون سرنشین لحاظ نماییم. در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته میزان مصرف انرژی به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود حال آنکه میزان مصرف انرژی به مسافت، سرعت پرنده، ارتفاع پروازی، وزن پرنده، وزن محموله و پارامترهایی از این دست وابسته است [۱۲-۱۱]. با توجه به مطالب فوق‌الذکر در بخش دوم مدل‌سازی مسئله مسیریابی تشریح خواهد شد. پس از مدل‌سازی مسئله مسیریابی الگوریتم تعیین میزان مصرف انرژی بر اساس مشخصات پرنده، وزن محموله محدودهٔ سرعت مجاز پروازی و سیستم کنترلی ارائه خواهد شد. در بخش چهارم بهینه‌سازی جهت مسئله مدل شده شرح داده خواهد شد. در بخش پنجم نتایج حاکی از شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۲-مدل‌سازی مسئله مسیریابی

به‌طورمعمول برای چگونگی سرویس‌دهی با مولتی روتورها در یک ناوگان همگن یا ناهمگن، باید اطلاعات کافی از آن مجموعه شامل مولتی روتورها، مشتریان و انبار، محدودهٔ سرویس‌دهی، شرایط جغرافیایی و غیره داشته باشیم. معمولاً مدل ریاضی که حاوی همه اطلاعات لازم از سیستم مورد بررسی است مبنای شروع طراحی مسئله مسیریابی خواهد بود [۱۴-۱۳]. بدیهی است هر چه مدل ریاضی به واقعیت سیستم تحت بررسی باشد، مسیرهایی که بر مبنای مدل ریاضی حاصل می‌شود، به واقعیت نزدیک‌تر بوده و پاسخ‌ها قابل اعتمادتر و کاربردی‌تر خواهند بود. باید خاطرنشان شد که در عمل امکان مدل‌سازی دقیق و کامل مسئله مسیریابی تقریباً غیرممکن است. به‌عبارت‌دیگر، هر مدلی که از مسئله واقعی بسازیم تا اندازه‌ای دقیق است و هیچ مدلی نیست که دقیقاً بیان‌کننده یک مسئله مسیریابی واقعی باشد؛ بنابراین هر مدل ریاضی تا اندازه‌ای غیردقیق است

غیردقیق بودن[۱] مدل ریاضی در مسائل مسیریابی می‌تواند معلول دو عامل باشد:

۱- ساختاری یا پارامتری[۲] که به دلیل عدم قطعیت در اندازه پارامترهای بکار رفته در مدل به وجود می‌آید. به بیان ساده پارامترهای یک مسئله مسیریابی معمولاً در یک وضعیت اندازه‌گیری شده، هرکدام یک مقدار نرمال و طبیعی دارد که آن را مقدار متوسط آن پارامتر می‌نامند. حال آنکه ممکن است مقدار اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف نسبت به مقدار متوسط یا میانگین تااندازه‌ای اختلاف داشته باشد مثلاً پارامترهایی نظیر سرعت پرنده، میزان توان مصرفی موردنیاز و غیره که برای افزایش سرعت محاسبات از مقدار متوسط آن در مدل استفاده می‌شود؛ بنابراین در یک مسئله مسیریابی، در حالت واقعی برخی پارامترها مقدار ثابتی نداشته و مقدار پارامترها تغییر می‌کند، درحالی‌که در مدل، برای هر پارامتر تنها یک مقدار در نظر گرفته می‌شود.

۲- بی‌دقتی مدل نشده[۳]: که به دلیل حذف پیچیدگی مدل ریاضی و ساده‌سازی مدل ایجاد می‌شود.

برای بیان دقیق‌تر مدل، توصیف برخی مفاهیم پیش‌نیاز بوده

۱uncertainties
۲Structured (parametric) Uncertainty
۳Unstructured Uncertainty

که به شرح زیر می‌باشد:

- **انبار**

یکی از اجزای اصلی مسئله مسیریابی انبار می‌باشد که می‌بایست از آن به تمام مشتریان، سرویس‌دهی صورت پذیرد. در این مقاله مدل‌سازی مسئله بر مبنای وجود یک انبار صورت گرفته است لذا کلیه پرنده‌ها از یک انبار خارج و در پایان مسیر به همان انبار بازخواهند گشت.

- **مشتریان**

جزء اصلی دیگر در مسئله مسیریابی مشتریان است که در اطراف انبار پراکنده‌اند و منتظر ارائه سرویس هستند. هر یک از مشتریان دارای تقاضای مشخصی است.

- **ربات‌های پرنده سرویس رسان**

یکی اصلی‌ترین ارکان مسئله مسیریابی ربات‌های پرنده سرویس رسان، (کوادروتورها) می‌باشند. در این مسئله فرض می‌شود که کوادروتورها در یک انبار مرکزی مستقر باشند و می‌بایست به مشتریان ارائه سرویس نمایند. با توجه به اینکه در این مقاله سعی در ارتقا ناوگان با کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت‌مندی مشتریان داریم لذا ناوگان ناهمگن در نظر گرفته خواهد شد تا به واقعیت نزدیک‌تر باشد، بدین‌صورت که ناوگان دارای چندین نوع کوادروتور مختلف است. باید خاطرنشان شد ویژگی‌های خاصی که برای ناوگان کوادروتورها می‌توان در نظر گرفت عبارت‌اند از:

◊ هر کوادروتور ظرفیت حمل بار محدودی دارد.

◊ با توجه به درخواست مشتریان برای هرکدام از کوادروتورها یک‌زمان اعزام از انبار در نظر گرفته خواهد شد که در آن زمان، انبار را برای سرویس‌دهی ترک خواهد کرد.

◊ ناوگان دارای چندین نوع کوادروتور با ظرفیت حمل بار متفاوت حداکثر ۲۵۰ گرم، ۵۰۰ گرم و ۷۵۰ گرم است.

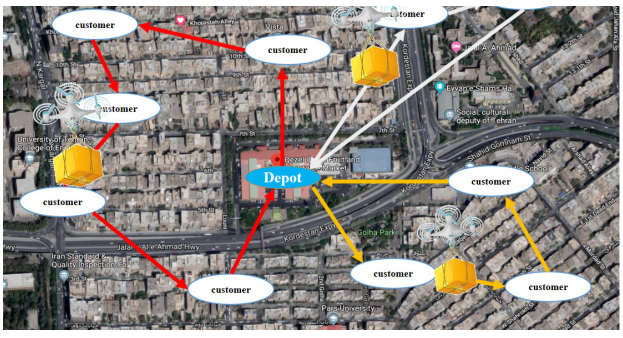
- **اطلاعات مسیر**

رکن دیگر مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، اطلاعات مربوط به مسیرهایی است که وسایل نقلیه می‌بایستی از طریق آن‌ها خود را به مشتریان برسانند. این اطلاعات شامل زمان سفر، مسافت و هزینه جابجایی می‌باشد. به‌عنوان‌مثال: زمان ارائه سرویس به مشتریان یکی دیگر از پارامترهایی است که می‌تواند در نوع مسئله مسیریابی وسیله نقلیه تأثیر بگذارد و چنانچه این زمان نیز متناسب با نوع سرویس‌دهنده و مسیری که سرویس‌گیرنده در آن قرار دارد متفاوت باشد، مسئله مشکل‌تر خواهد بود. در مواردی که زمان ارائه سرویس به مشتریان تابعی از سرویس‌دهنده نباشد، می‌توان از این زمان صرف‌نظر کرد.

- **شبکه ارتباطی بین مشتریان و انبار**

نکته دیگر که در یک مسئله مسیریابی باید در نظر گرفته شود نحوه ارتباط بین مشتریان (هر مشتری با دیگر مشتریان) است. در این مقاله فرض بر این است که بین تمام مشتریان و انبار مسیر وجود دارد؛ یعنی سرویس‌دهنده می‌تواند از هر یک از مشتری به تمام مشتری‌های دیگر حرکت کند [۱۶-۱۴].

در این مقاله هدف نهایی، ارائه راهکاری جدید جهت سرویس‌دهی به تمام مشتریان با حداقل نمودن مسافت کل و یا کل زمان سفر طی شده توسط پرنده‌ها و حداقل نمودن تعداد پرنده‌ها با در نظر گرفتن توان مصرفی می‌باشد. در شکل ۱، شماتیک مسیرهای سرویس‌دهی به مشتریان برای یک مسئله مسیریابی به ازای ۱۰ مشتری و ۳ پرنده نشان داده‌شده است



شکل ۱: شماتیک یک مسئله مسیریابی با ۱۰ مشتری و تعداد ۳ کوادروتور

۳-مفروضات مسئله

فرضیات مسئله مسیریابی را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱) هر مسیری دقیقاً یک‌بار و توسط یک پرنده باید ملاقات شود.

۲) همه مسیرها از انبار شروع و به انبار ختم می‌شوند.

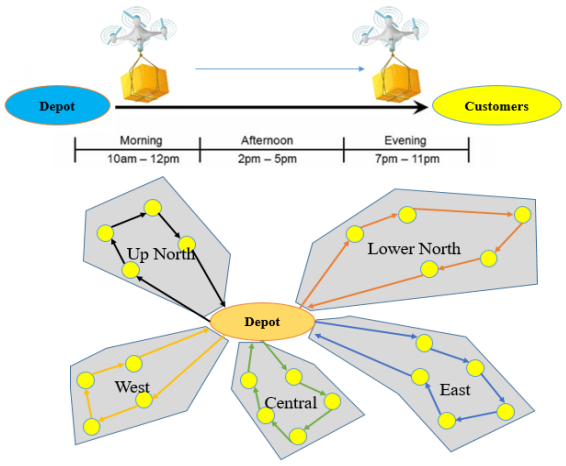
۳) تقاضای کلیه مشتریان به یک انبار (انبار مرکزی) اختصاص داده می‌شود.

۴) مجموع ظرفیت تقاضای مشتریان روی هر مسیر تعیین‌شده برای هر پرنده (کوادروتور) نباید از ظرفیت حمل بار آن پرنده تجاوز نماید.

۵) زمان پیمودن یک مسیر و رسیدن به هر مشتری نباید از حداقل و حداکثر زمان مجاز درخواست شده توسط مشتری تجاوز نماید.

۶) همان‌طور که قبلاً اشاره شد تمام پرنده‌ها، دارای ظرفیت مشخص و ثابتی هستند. با توجه به اینکه در این پژوهش فرض شده ناوگان ناهمگن است لذا حداقل دو مدل کوادروتور خواهیم داشت.

با توجه به مطالب فوق‌الذکر برای درک بهتر، در شکل ۲ شماتیک برای یک مسئله مسیریابی به ازای مشتریان در چندین ناحیه با سفارشات زمانی و مکانی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیک مسیرهای موجود (تور) برای یک مسئله مسیریابی- مناطق سرویس‌دهی، محدودهٔ زمانی و مشتریان

تور یا گراف غیرجهت‌دار: یک مسئله مسیریابی بر روی گراف‌های غیرجهت‌دار $G(V,A)$ که شامل مجموعه نودها $V=\{0,1,\dots,n\}$ و مجموعه مسیرهای بین نودها $A=\{(i,j),i,j \in V\}$ است، تعریف می‌شود.

اجزا مسئله (اندیس‌ها و پارامترها)

در ادامه اندیس‌ها، پارامترهای مدل و متغیرها بیان می‌شوند: بیان شد که $A=\{(i,j),i,j \in V\}$ مجموعه مسیرهای بین نودها می‌باشد. باید اشاره‌کنیم که هزینه جابجایی بین نودها که در اکثر موارد به‌صورت (فاصله ضرب‌در هزینه هر واحد مسافت پیموده شده) به‌عنوان هزینه بین دو گره در نظر گرفته می‌شود. ازآنجایی‌که هزینه، قیمت برحسب هر متر جابجایی به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود از ترم عدد هزینه‌ای صرف‌نظر کرده و فاصله پیموده شده را به‌عنوان معیاری برای سنجش هزینه اتخاذ نموده‌ایم. فاصله بین دو مشتری، نود i و j با نماد C_{ij} نشان داده می‌شود و فرض می‌شود مشتریان ثابت بوده لذا مقدار مذکور ثابت می‌باشد. $K=\{1,2,m\}$ مجموعه پرنده‌های ناهمگن از انواع متفاوت نظیر کوادروتور با قابلیت حمل بار حداکثر نیم، یک و یک و نیم کیلوگرم، است که ظرفیت بار هر نوع پرنده را با Qk نشان می‌دهیم. هر گره $i=\{1,n\}$ بیانگر یک تقاضای حمل می‌باشد.

اندیس‌ها:

- i و j: تعداد مشتریان (گره یا نود) $i \text{ or } j=1,2,\dots,n$
- k: تعداد کوادروتورها $k=1,2,\dots,m$
- t: زمان مورد انتظار مشتری برای دریافت یا تحویل کالا

پارامترها:

- C_{ij}: هزینه سفر از گره i به گره j (برحسب فاصله)
- M: تعداد پرنده (که ناهمگن در نظر گرفته‌شده است.)
- n: تعداد تقاضاها (تعداد مشتریان)
- $q(i)$: تقاضای مشتری iام
- $Q(k)$: ظرفیت قابل حمل توسط پرنده kام

- δi: جریمه برای سفارش iام در صورت برآورده نشدن در زمان تعیین‌شده.
- $t_{min}(i)$: حداقل زمان مجاز برای دریافت سفارش مشتری iام
- $t_{max}(i)$: حداکثر زمان مجاز برای دریافت سفارش مشتری iام

متغیرها

- y_i^{kt} یک متغیر باینری (صفر-یک) است. درصورتی‌که پرنده kام به سفارش مشتری iام در زمان t تخصیص داده‌شده باشد برابر یک خواهد بود در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.
- p_k^t مجموع سفارش‌های تخصیص داده‌شده به پرنده k ام در زمان t
- z_l^{kt} یک متغیر باینری (صفر-یک) است. درصورتی‌که در زمان tام، پرنده kام به در مسیر l باشد برابر یک خواهد بود، در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

روابط حاکم بر مدل‌سازی

در ادامه در این بخش یک مدل ریاضی با پنج تابع معیار مختلف ارائه می‌شود که به شرح زیر است [۱۵-۱۴]:

۱. هزینه حمل‌ونقل (α)
۲. جریمه تأخیر برای زمان تحویل یا دریافت کالا (δ)
۳. هزینه‌های متغیر مربوط به حمل (V)
۴. هزینه‌های ثابت عملیاتی (F)
۵. توان الکتریکی مصرفی (E)

با توجه به این‌که در اینجا چندین معیار وجود دارد در فرمولاسیون ریاضی سعی شده تا به‌صورت جداگانه و قابل‌درک روابط بیان شود که به شرح زیر می‌باشد:

- **تابع هزینه ۱**

در ابتدا توجه خود را بر روی هزینه حمل‌ونقل (α) و جریمه تأخیر برای زمان تحویل یا دریافت کالا (δ) معطوف می‌کنیم. در این مدل بهترین ترکیب تقاضا در هر مسیر و هر دوره زمانی ارائه‌شده به‌نحوی‌که منجر به کمینه شدن هزینه حمل‌ونقل می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد از متغیر y_i^{kt} برای بررسی تقاضاها استفاده می‌شود بدین‌صورت که اگر تقاضای مشتری iام به پرنده kام از مجموعهٔ پرنده‌های ناهمگن با ظرفیت $Q_k \in Q$ در زمان t تخصیص داده شود مقدار متغیر مذکور یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. ازآنجایی‌که انتظار می‌رود تقاضای هر مشتری در بازه زمان موردنظر مشتری یعنی $t \in \left[r_i^-, r_i^+\right]$ انجام شود لذا درصورتی‌که از این بازه تخطی شود باید یک جریمه اعمال شود که با δ_i^t نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور ساده‌سازی بهترین محدوده زمانی برای مشتری iام (پنجره زمانی تقاضای iام) به‌صورت $T_i = \left[r_i^-, r_i^+\right]$ بیان خواهد شد. متغیر عدد صحیح p_k^t برای نشان دادن وزن بار در نظر گرفته‌شده برای پرنده kام در زمان t استفاده‌شده است. همچنین از متغیر z_l^{kt} برای هزینه پیمایش مسیر lام استفاده می‌شود بدین‌صورت که اگر پرنده kام در زمان t از مسیر lام عبور کرده باشد عدد مذکور یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. تابع معیار مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل بار به‌صورت تعریف می‌نماییم:

$$(CS1)\min \sum_{i\in V'} \sum_{\substack{k\in\kappa \\ Q_K\in Q}} \sum_{t\in T_i} \delta_i^t y_i^{Q_K kt} + \sum_{l\in L} \sum_{\substack{k\in\kappa \\ Q_K\in}} \sum_{t\in T} \alpha_l z_l^{Q_K kt} \quad (۱)$$

تحت قیود:

$$\sum_{\substack{k\in\kappa \\ Q_K\in Q}} \sum_{t\in T_i} y_i^{Q_K kt} = 1 \quad \forall i\in V, Q_k \in Q \quad (۲)$$

$$p_{Q_K k}^t \geq \sum_{i\in V | t\in T_i} \frac{q_i\, y_i^{Q_K kt}}{2} \quad \forall t\in T, k\in K, Q_k \in Q \quad (۳)$$

$$p_{Q_K k}^{t} \geq \sum_{i \in V | t \in T_i} \frac{q_i \, y_i^{Q_K kt}}{2} \quad \forall t \in T, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۴)$$

$$z_l^{Q_K kt} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, t \in T, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۵)$$

$$y_i^{Q_K kt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, t \in T_i, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۶)$$

$$0 \leq p_{Q_K k}^{t} \leq W_uav \ \ and \ integer \quad \forall t \in T_i, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۷)$$

در رابطه (۱)، هدف تابع معیار، کمینه‌سازی مسافت و هزینه حمل‌ونقل است. محدودیت‌های (۲)، الزام مدل جهت بررسی همهٔ مشتریان می‌باشد بدین‌صورت که هر مشتری باید فقط یک بار و توسط یک پرنده سرویس‌دهی شود. محدودیت‌های (۳)، مربوط به محاسبهٔ وزن بارهای تخصیص داده شده به پرنده kام و p_k^t وزن مربوطه در زمان t برای پرنده مذکور می‌باشد؛ که در آن q_i مجموع وزن بارهای تخصیص داده شده به پرنده در بازه زمانی $\left[r_i^-, r_i^+\right]$ می‌باشد؛ که باید از ظرفیت بار پرنده کم‌تر باشد. محدودیت (۴) متغیر تخصیص بار برای محاسبه هزینه حمل بار برحسب مسافت می‌باشد. محدودیت‌های (۵-۳ تا ۷-۳) مربوط به طبیعت متغیرها می‌باشد.

لازم به ذکر است که به‌منظور تضمین هر چه‌بهتر محدودیت (۳) محدودیت روی حداکثر وزن بار تخصیص داده‌شده بر اساس ظرفیت پرنده kام توسط مشتری iام در زمان t به‌صورت زیر می‌باشد:

$$p_{Q_K k}^{t} \leq \sum_{i \in V | t \in T_i} \frac{q_i \, y_i^{Q_K kt}}{2} + 1 \quad \forall t \in T, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۸)$$

بدون محدودیت فوق، در برخی موارد حداکثر بار تخصیص داده‌شده به پرنده kام از ظرفیت بار مجاز پرنده تجاوز خواهد کرد و پاسخ‌ها (مسیرهای تخصیص داده‌شده به پرنده‌ها) غیرقابل استفاده خواهند بود.

ازآنجایی مسیرهای پیموده شده نباید مجدداً طی شوند از محدودیت زیر در آن استفاده می‌شود:

$$y_i^{(\mathrm{Q_k}\, k-1)t} \geq y_i^{\mathrm{Q_k}\, kt} \quad \forall i \in V, t \in T_i, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۹)$$

در عبارت فوق متغیر y_i^{kt}، مربوط به تقاضای iام تخصیص داده‌شده به پرنده kام می‌باشد.

- **تابع هزینه ۲**

بخش دوم مدل‌سازی به هزینه‌های حمل‌ونقل (V) و هزینه‌های ثابت عملیاتی (F) اختصاص داده‌شده است. هزینه‌های مذکور شامل یک مؤلفه هزینه مسافت و یک مؤلفه هزینه جانبی پرنده (تعمیر و نگهداری و استهلاک) می‌باشد. در این بخش یک مدل با چندین مسیر به ازای پنجره‌های زمانی درخواستی ایجاد خواهد شد که هر مسیر دارای پنجره زمانی و مسافت‌های مشخصی می‌باشد و هدف این بخش کمینه‌سازی متغیر مربوط به هزینه‌ها بر اساس معیارهایی نظیر مسافت پیموده شده و هزینه‌های ثابت برای وسیله مورد استفاده می‌باشد. متغیر x_{ij}^{kt} در رابطهٔ (۱۰) برابر یک خواهد بود درصورتی‌که پرنده kام در زمان t، مسیر مستقیم بین دو مشتری $(i,j) \in \mathrm{A}$ (i,j) را در بازه زمانی بین دو زمان درخواست (اشتراک زمان درخواست‌های مشتری iام و j ام $t \in T_i \mid T_j$) بپیماید در غیر این صورت متغیر مذکور برابر صفر خواهد بود. مدل مربوطه به هزینه‌های فوق‌الذکر به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است:

$$(CS2) \min V\left(\sum_{(i,j)\in \mathrm{A}} c_{ij} \sum_{\substack{k\in\kappa \\ \mathrm{Q_k}\in Q}} \sum_{t\in T_i \mid T_j} x_i^{\mathrm{Q_k}\, kt}\right) + F\left(\sum_{j\in \mathrm{V}} \sum_{\substack{k\in\kappa \\ \mathrm{Q_k}\in Q}} \sum_{t\in T_i \mid T_j} x_{0j}^{\mathrm{Q_k}\, kt}\right) \qquad (۱۰)$$

تحت قیود:

$$\sum_{j\in A} x_{ij}^{\mathrm{Q_k}\, kt} = \sum_{j\in A} x_{ji}^{\mathrm{Q_k}\, kt} \qquad (۱۱)$$
$$\forall i \in A,\ t \in T_i \mid T_j,\ \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q$$

$$\sum_{j\in \mathrm{V} | t\in T_j} x_{0j}^{\mathrm{Q_k}\, kt} \leq 1 \quad \forall t \in T, \mathrm{k} \in K, \mathrm{Q_k} \in Q \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i\in \mathrm{V}|t\in T_i} x_{i0}^{\mathrm{Q_k}\,kt} \le 1 \quad \forall t\in T,\ \mathrm{k}\in K, \mathrm{Q_k}\in Q \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{j\in \mathrm{V}|t\in T_i} x_{ij}^{\mathrm{Q_k}\,kt} = y_j^{\mathrm{Q_k}\,kt} \quad \forall j\in V,\ t\in T_j,\ \mathrm{k}\in K, \mathrm{Q_k}\in Q \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in S} x_{ij}^{\mathrm{Q_k}\,kt} \le |S| - r(\mathrm{s}) \qquad (۱۵)$$
$$\forall S\subset V, |S|>2, t\in T_i \mid T_j,\ \mathrm{k}\in K$$

$$x_{ij}^{Q_k kt} \in \{0,1\} \qquad (۱۶)$$
$$\forall i,j\in V : \mathrm{i}\neq \mathrm{j},\ t\in T_i \mid T_j,\ \mathrm{k}\in K, Q_k\in Q$$

در رابطه (۱۰)، هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های متغیر و ثابت وابسته به مسافت کل پیموده شده است. یک نمونه از هزینه ثابت انرژی موردنیاز و مجوزها و هزینه ترک دپو (انبار) می‌باشد. محدودیت رابطه (۱۱)، مربوط به تعادل جریان گره‌ها می‌باشد بدین معنی که هزینه جابجایی از گره i به j برابر هزینه جابجایی از گره j به i می‌باشد. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳)، جهت محدودسازی هر پرنده به تنها یک‌بار سفر در یک دوره زمانی می‌باشد.

در محدودیت (۱۴)، متغیر x_{ij}^{kt} برای اتصال لینک بین متغیرهای گره‌های i و j پیموده شده توسط پرنده kام در زمان tام می‌باشد. محدودیت (۱۵) مربوط به گرد کردن حد بالای بارهای تخصیص داده شده به پرنده‌ها بر اساس حداکثر ظرفیت بار مجاز پرنده‌ها می‌باشد. در رابطه مذکور تابع $r(\mathrm{s})=\left\lceil \frac{\sum_{j\in s} q_i}{Q} \right\rceil$ مربوط به چک نمودن ظرفیت می‌باشد. محدودیت (۱۶) مربوط به طبیعت متغیرها می‌باشد.

- **تابع هزینه ۳ (توان مصرفی)**

توان مصرفی یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین پارامترها در مسئله سرویس‌دهی می‌باشد بدین‌صورت که اگر بتوان در مدل‌سازی مسئله مسیریابی میزان مصرف انرژی یا توان موردنیاز را بر حسب وزن بار، وزن پرنده، مشخصات فیزیکی و توان مصرفی در نظر گرفت مسیرهای به‌دست‌آمده از نظر کاربردی و اقتصادی بهینه‌تر و قابل اعتمادتر خواهند بود. بدین منظور باید به مدل‌سازی رفتار پرنده و توان مصرفی آن بپردازیم. تابع معیار مربوطه به کمینه‌سازی توان مصرفی تحت قید معادلات دینامیکی کوادروتور به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است:

$$(CS3)\min P\left(\sum_{(i,j)\in \mathrm{A}} c_{ij}\sum_{\substack{k\in\kappa\\ Q_k\in Q}}\sum_{t\in T_i \mid T_j} x_i^{Q_k kt}\right) \qquad (۱۷)$$

روابط موردنیاز جهت محاسبهٔ توان موردنیاز برای یک کوادروتور در بخش مدل‌سازی دینامیکی و کنترلی ارائه شده است.

- **تابع هزینه نهایی**

با توجه به مدل و روابط بیان‌شده، تابع هزینه نهایی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}(CS4)&\sum_{i\in V'}\sum_{\substack{k\in\kappa\\ Q_k\in Q}}\sum_{t\in T_i}\delta_i^t y_i^{Q_k kt}\\ &+\sum_{l\in L}\sum_{\substack{k\in\kappa\\ Q_k\in Q}}\sum_{t\in T}\alpha_l z_l^{Q_k kt}\\ &+(E+V)\left(\sum_{(i,j)\in \mathrm{A}} c_{ij}\sum_{\substack{k\in\kappa\\ Q_k\in Q}}\sum_{t\in T_i \mid T_j} x_i^{Q_k kt}\right)\\ &+F\left(\sum_{j\in \mathrm{A}}\sum_{\substack{k\in\kappa\\ Q_k\in Q}}\sum_{t\in T_i \mid T_j} x_{0j}^{Q_k kt}\right)\end{aligned} \qquad (۱۸)$$

تحت قیود (۲ تا ۹) و (۱۱ تا ۱۶).

۴- مدل‌سازی دینامیکی و کنترلی جهت محاسبه توان مصرفی

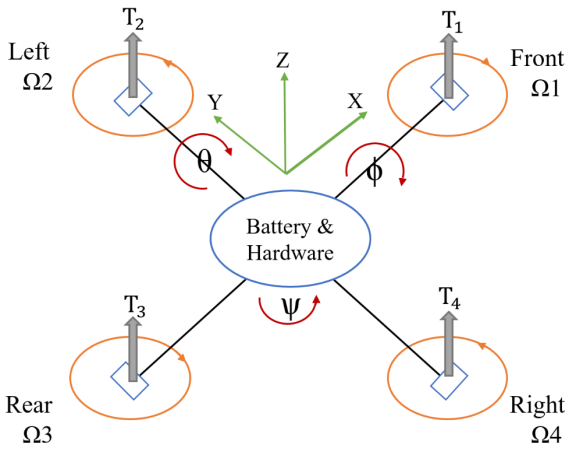
وسایل حمل‌ونقل بار و سرویس‌دهی در این مقاله پرنده‌های عمود پرواز (کوادروتورها) با قابلیت هدایت و کنترل خودکار می‌باشند. در حالت کلی هدایت و کنترل این پرنده با استفاده از سیستم‌های کنترل از راه دور و یا سیستم‌های متصل به پرنده (on board) و به‌صورت خودکار صورت می‌پذیرد به‌نحوی‌که امکان باقی ماندن پرنده در موقعیت و وضعیت مطلوب فراهم می‌گردد. در این راستا و به‌منظور نیل به اهداف تعقیب مسیر و حفظ وضعیت تا به امروز پژوهش‌های زیادی با الگوریتم‌های متعددی بسته به نوع عملیات، ساختار پرنده، قدرت پردازنده کنترلی و

دیگر موارد صورت پذیرفته است [۵-۳]. یکی از الگوریتم‌های کنترلی قدرتمند و کاربردی جهت حفظ موقعیت و تعقیب مسیر، الگوریتم کنترل فازی می‌باشد [۷-۶]. از آن جهت که دینامیک کوادروتورها غیرخطی بوده و در واقعیت برای مدل‌سازی از ساده‌سازی‌های استفاده می‌شود می‌تواند از الگوریتم فازی بهینه بهره جست به‌نحوی‌که پارامترهای کنترلی در صورت لزوم و بسته شرایط قابلیت به‌روزرسانی داشته باشد که برای فرایند به‌روزرسانی پارامترهای کنترلی می‌تواند از روش‌هایی نظیر بهینه‌سازی، شبکه عصبی و غیره بهره برد.

۵-معادلات حرکت

بدنهٔ کوادروتور به شکل صلیب (┼) است که بار مفید (سنسورها، پردازشگر مرکزی، کنترلر، دوربین و تجهیزات سرویس‌دهی به مشتریان و حمل بار) در مرکز آن قرار دارد. غالباً در هر گوشهٔ بدنه پرنده مذکور یک موتور الکتریکی (BLDC[۱]) نصب می‌شود که دارای یک پره سبک است که از آن با عنوان روتور در این مقاله یاد می‌کنیم. اجرای کلیه حرکات مانوری کوادروتور با تغییر در سرعت دورانی در موتورهای الکتریکی فوق‌الذکر صورت می‌پذیرد. در حرکت عمودی پرنده مذکور، برای برخاستن از زمین و همچنین حالت هاور، مجموع کل نیروی بالابر ایجاد شده توسط روتورها در جهت عمودی و در خلاف جهت نیروی وزن می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از چرخش پرنده حول محورهای بدنه اصلی، نیروی بالابر تولید شده توسط هر یک از روتورها، باید دارای مقدار یکسانی باشد. بنابراین با افزایش یا کاهش یکسان سرعت روتورها حرکت در راستای عمودی امکان‌پذیر خواهد شد.

در این وسیله چرخش حول محور (x) را حرکت رول با علامت (ϕ)، چرخش حول محور (y) را حرکت پیچ با علامت (θ) و چرخش حول محور عمودی گذرنده از مرکز جرم را حرکت یاو با علامت (ψ) می‌نامیم که در شکل ۲ شماتیک این حرکت‌ها نشان داده شده است. حرکت پیچ با افزایش (کاهش) سرعت موتور عقبی و کاهش (افزایش) سرعت موتور جلویی به‌طور همزمان حاصل می‌شود. حرکت رول به‌طور مشابه با استفاده از موتورهای طرفین ایجاد می‌شود. حرکت یاو نیز با افزایش (کاهش) سرعت موتورهای جلو و عقب و کاهش (افزایش) سرعت موتورهای کناری حاصل می‌شود. این حرکت باید با ثابت نگه داشتن نیروی تراست کل روتورها انجام شود.



شکل ۳- شماتیک ساده شده دیاگرام کوادروتور [۱۷]

در این مقاله برای استخراج معادلات دینامیکی کوادروتور از معادلات نیوتن، اویلر و تئوری مومنتوم استفاده شده است. در مدل‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. ساختار کوادروتور متقارن است.

۲. ساختار کوادروتور جسم صلب است.

۳. پره‌ها جسم صلب هستند در نتیجه فلپینگ[۲] اتفاق نمی‌افتد.

۴. مرکز جرم بدنه فرض شده است.

۵. محورهای دستگاه بدنی منطبق با محورهای اصلی اینرسی کوادروتور هستند در نتیجه ماتریس اینرسی I قطری می‌شود که سبب ساده شدن معادلات خواهد شد.

۶. تراست و درگ متناسب با توان دوم سرعت زاویه‌ای پره‌ها هستند.

برای تشریح و درک بهتر از موقعیت و وضعیت یک کوادروتور هنگام حرکت کوادروتور می‌توان از دو سیستم مختصات بدنی و

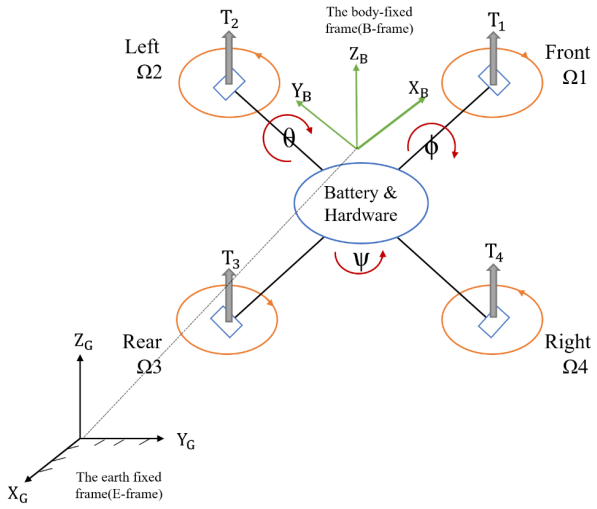
۱ Brush-Less DC
۲ Flapping

اینرسی بهره گرفت (شکل ۳).

۱- دستگاه مختصات چسبیده به زمین (E)[۱]

۲- دستگاه مختصات بدنی (B)[۲]

برای استخراج معادلات حرکت نیازمند استفاده از قانون نیوتن هستیم و این قانون تنها در دستگاه اینرسی (مرجع لخت) معتبر است. در دستگاه بدنی ماتریس اینرسی نامتغیر با زمان است.



شکل ۴- شماتیک دستگاه‌ها مختصات اینرسی و بدنی برای کوادروتور [۱۷]

برای به دست آوردن مدلی برای تحلیل رفتار یک پرنده، باید معادلات مربوط به سینماتیک و دینامیک آن را به دست آورد.

یک پرنده با فرض صلب بودن در فضا، دارای شش درجهٔ آزادی (DOF[۳]) است که سه درجه آن برای توصیف موقعیت مرکز جرم جسم (COM[۴]) و سه درجه دیگر برای توصیف جهت‌گیری پرنده در فضا به کار می‌رود. ازآنجایی‌که هر درجهٔ آزادی دو متغیر حالت را در بر می‌گیرد (موقعیت و سرعت)، به دوازده معادلهٔ دیفرانسیل مرتبه اول برای توصیف کامل حرکت جسم نیازمندیم. با استفاده از روابط نیروها و گشتاورها معادلات حرکت در دستگاه اینرسی به دست می‌آید [۱۸-۱۷]. معادلات شتاب‌های زاویه‌ای برای یک پرنده به شرح زیر می‌باشد:

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}\frac{I_Y - I_Z}{I_X} - \frac{I_R}{I_X}\dot{\theta}\Omega_R + \frac{lb}{I_X}u_1$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}\frac{I_Z - I_X}{I_Y} + \frac{I_R}{I_Y}\dot{\phi}\Omega_R + \frac{lb}{I_Y}u_2 \qquad (۱۹)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\phi}\frac{I_X - I_Y}{I_Z} + \frac{d}{I_Z}u_3$$

در رابطه (۱۹) (ϕ,θ,ψ) زوایای اویلر (رول (ϕ)، پیچ (θ) و یاو (ψ)) نسبت به دستگاه اینرسی می‌باشند. (I_X, I_Y, I_Z) به ترتیب ممان اینرسی حول محور X، Y و Z می‌باشند البته باید اشاره داشت که در اینجا فرض شده ساختار کوادروتور متقارن است یعنی $(I_{XY} = I_{YZ} = I_{ZX} = 0)$. Ω_R مجموع سرعت زاویه‌ای روتورها می‌باشد. u_i ,$i = 1,..,4$ ورودی‌های کنترلی می‌باشند. معادلات شتاب‌های انتقالی پرنده در دستگاه کارتزین به شرح زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$\ddot{X} = \sin(\theta)\cos(\phi)\frac{b}{m}u_4$$

$$\ddot{Y} = -\sin(\phi)\frac{b}{m}u_4 \qquad (۲۰)$$

$$\ddot{Z} = -g + \cos(\theta)\cos(\phi)\frac{b}{m}u_4$$

در رابطه (۲۰) (X,Y,Z) بیانگر بردار موقعیت پرنده در دستگاه اینرسی، m جرم پرنده (به همراه تجهیزات)، g شتاب جاذبه گرانشی زمین، b ضریب تراست و l فاصله مرکز دوران روتور (پره) تا مرکز بدنه می‌باشند.

در رابطه (۱۹ و ۲۰) کنترلرها برحسب سرعت چرخش پره‌ها مطابق با رابطه (۲۱) قابل استخراج هستند:

۱ The earth fixed frame(E-frame)
۲ The body-fixed frame(B-frame)
۳ Degrees Of Freedom
۴ Center of Mass

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

$$\Omega_R = \left(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4\right) \quad (۲۲)$$

در معادله (۲۱)، u۱ تا u۴ به ترتیب مربوط به گشتاور رول، گشتاور پیچ، گشتاور یاو و نیروی تراست هستند.

محاسبه توان مصرفی موردنیاز

با استفاده فرمان‌های تولید شده توسط الگوریتم ارائه‌شده در مرجع [۱۲-۱۱] می‌توان دور موردنیاز هر یک از موتورهای الکتریکی را محاسبه نمود. پس از محاسبه دور موردنیاز برای هر موتور الکتریکی می‌توان با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۴) برای موتورهای الکتریکی[۱] ولتاژ و جریان موردنیاز در هر لحظه را به دست آورد. بنابراین با ولتاژ و جریان به‌دست‌آمده به‌راحتی می‌توان موردنیاز کل برای حمل بار را به دست آورد.

$$V = \left(\frac{R \times d}{K}\right) \times \Omega^2 + \left(K \times \Omega\right) \quad (۲۳)$$

$$\mathrm{V} = \left(\mathrm{R} \times \mathrm{I}\right) + \left(K \times \Omega\right) \quad (۲۴)$$

رابطه (۲۷) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\mathrm{I} = \frac{V - \left(K \times \Omega\right)}{\mathrm{R}} \quad (۲۸)$$

$$\mathrm{P} = \mathrm{V} \times \mathrm{I} \quad (۲۹)$$

تا بدین جا مسئله مسیریابی برای وسایل نقلیه، برخی از حوزه‌های کاربردی مسیریابی وسایل نقلیه، ضرورت مدل‌سازی در مسئله مسیریابی برای وسایل نقلیه و درنهایت مدل‌سازی مسئله مسیریابی برای ناوگان ناهمگن بیان شد. در ادامه نوبت به حل مسئله می‌رسد.

راهکار پیشرو بدین‌صورت خواهد بود که موقعیت مشتریان ثابت فرض گردیده است. با توجه به اینکه موقعیت مشتریان ثابت فرض شده لذا فاصله هر مشتری تا دیگر مشتریان و همچنین تا انبار به قابل استخراج خواهد بود. از طرفی هر مشتری یک پنجره زمانی برای دریافت سفارش تعیین می‌کند که هدف خدمت‌رسانی در محدوده زمانی تعیین شده است. بدین ترتیب می‌بایست با رعایت محدوده حداقل و حداکثر سرعت مجاز پروازی، مسیرهای بهینه جهت سرویس‌دهی به مشتریان را به دست آورد به‌نحوی‌که بر اساس مدل دینامیکی ربات پرنده، انرژی موردنیاز بر حسب مسافت و وزن بار مورد نظر بهینه گردد.

به‌منظور حل مسئله می‌توان از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک [۱۹] استفاده نمود به‌نحوی‌که قیود مسئله ارضا و تابع معیار کمینه گردد. الگوریتم حل مسئله در ادامه ارائه شده است:

۱- شروع

۲- مقداردهی اولیه مشخصات ناوگان و پارامترهای مسئله نظیر تعداد پرنده‌ها، وزن خالص هر پرنده، ماکزیمم ظرفیت بار مجاز برای هر پرنده (بر حسب وزن و حجم)، تعداد مشتریان، موقعیت هر مشتری، پنجره زمانی مجاز برای سرویس‌دهی به هر مشتری. حداکثر سرعت مجاز هر یک از کوادروتور، حجم و وزن بار هر مشتری و غیره.

۳- تعیین فواصل مشتریان بر حسب داده‌های مرحله ۲ با رابطهٔ زیر:

$$distance\,ij = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2}$$

در رابطه فوق اندیس‌های i و j نماد مشتری iام و jام می‌باشد. x و y، نماد مختصات طولی و عرضی مشتریان یا انبار می‌باشد.

۴- فراخوانی حل‌گر بهینه‌ساز چیتا

۵- دریافت یک پاسخ از حل‌گر بهینه‌ساز چیتا

۶- فراخوانی تابع قیود و محاسبه قیود بر حسب پاسخ دریافتی

۷- فراخوانی تابع معیار و محاسبه هزینه بر حسب پاسخ دریافتی

- تذکر: با توجه اینکه تابع معیار و قیود چندین بخش دارد

۱ brushless dc (BLDC) electric motor

باید در این مرحله هر تابع معیار و قیود تحت آن، فراخوانی و محاسبه شود؛ مثلاً فراخوانی تابع توان مصرفی بر حسب معادلات پرنده و محاسبه توان مصرفی هر مسیر و فراخوانی دیگر توابع هزینه.

۸- بررسی شرط توقف حلقه بهینه‌سازی در صورت عدم ارضا قیود اجرا مراحل ۵ تا ۸

۹- خروج از حلقه بهینه‌سازی

۱۰- ارسال مسیرهای به‌دست‌آمده به سیستم هدایت‌گر پرنده‌ها جهت هدایت و کنترل پرنده‌ها برای خدمت‌رسانی به مشتریان.

۱۱- پایان

۶-نتایج حاصل از شبیه‌سازی

تا بدین جا روابط موردنیاز جهت حل تشریح گردید. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله مسیریابی برای ربات‌های پرنده بدون سرنشین در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان خرید کالاهای اینترنتی ارائه شده است.

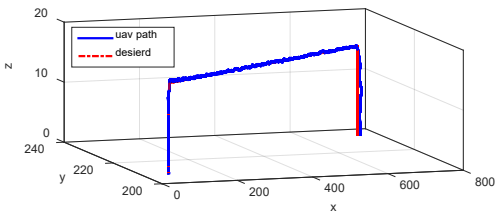
در شبیه‌سازی فرض گردیده ارتفاع پروازی ثابت و کلیه پرنده‌ها در یک ارتفاع مشخص و ثابت پرواز می‌نمایند. بدین ترتیب با فرض پرواز کلیه پرنده‌ها در ارتفاع، توان موردنیاز در فازهای ابتدایی و انتهایی پرواز، جهت حرکت برخاست و نشست ربات‌های پرنده ثابت و برحسب وزن پرنده و محموله محاسبه می‌گردد.

پارامترهای فیزیکی کوادروتور از مراجع [۱۲-۱۱] استخراج شده که در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: ثابت‌های مدل

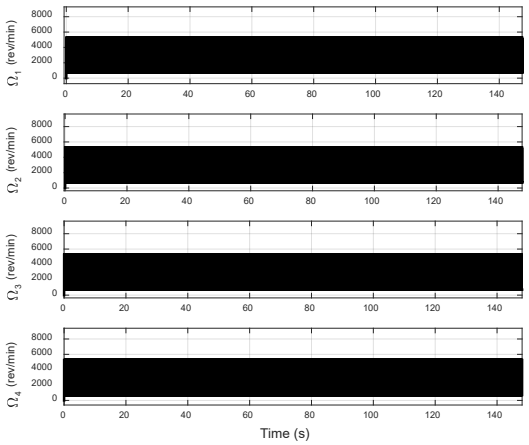
ردیف	مشخصات فیزیکی	واحد	مقادیر
۱	طول بازو (l)	متر (m)	۰,۲۳۲
۲	جرم (m)	کیلوگرم (kg)	۰,۵
۳	ضریب تراست (b)	نیوتن در مربع ثانیه (N.s^۲)	۵-۳,۱۳e
۴	ضریب درگ (d)	نیوتن متر در مربع ثانیه (N.s^۲)	۷-۷,۵e
۵	ممان اینرسی حول محور x (Ix)	کیلوگرم. مترمربع (kg.m^۲)	۳-۶,۲۲۸e
۶	ممان اینرسی حول محور (Iy)y	کیلوگرم. مترمربع (kg.m^۲)	۳-۶,۲۲۸e
۷	ممان اینرسی حول محور z (Iz)	کیلوگرم. مترمربع (kg.m^۲)	۲-۱,۱۲۱e

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته در شکل‌های (۵) تا (۹) ارائه شده است.



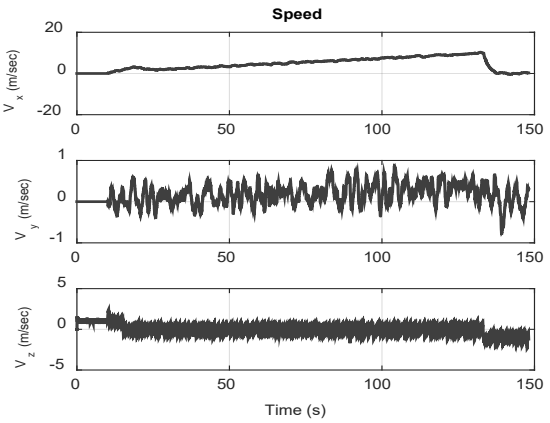
شکل ۵- شماتیکی از نمای سه‌بعدی یک مسیر پروازی از انبار تا اولین مشتری

در شکل (۵) شماتیکی از نمای سه‌بعدی یک مسیر پروازی از انبار تا اولین مشتری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پرنده در سه راستا به‌خوبی توانسته مسیر را تعقیب نماید. در ادامه در شکل (۶) دور روتورها در طی زمان ترسیم شده است

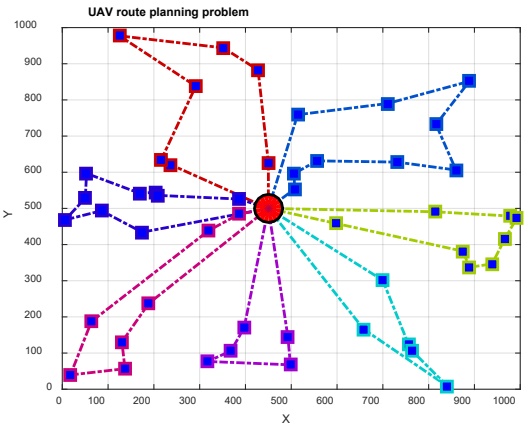


شکل ۶- سرعت زاویه‌ای روتورهای ربات پرنده در یک مسیر پروازی خدمات‌رسانی

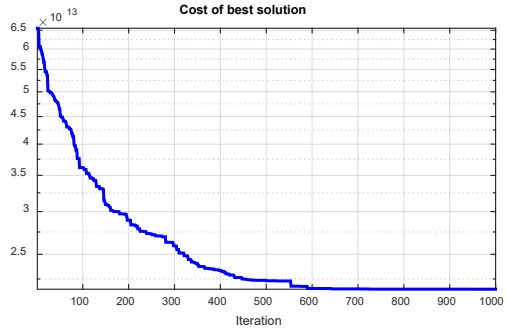
در ادامه در شکل ۷، تاریخچه تغییرات زمانی مؤلفه‌های سرعت پرنده در یک مسیر پروازی خدمات‌رسانی ترسیم شده است.



شکل ۷- تاریخچه تغییرات زمانی مؤلفه‌های سرعت پرنده در یک مسیر پروازی خدمات‌رسانی



شکل ۸- شماتیکی از پاسخ مسیرهای خدمت‌رسانی با معیار هزینه، زمان، مصرف توان تحت قیدهای پرنده و مشتری- به ازای ۵۰ مشتری و ۱۰ پرنده



شکل ۹- روند بهینه شدن تابع معیار با معیار هزینه، زمان، مصرف توان تحت قیدهای پرنده و مشتری- به ازای ۵۰ مشتری و ۱۰ پرنده

۷-نتیجه‌گیری

با توجه به رشد روزافزون تجارت جهانی و ضرورت تحویل سریع سفارش‌ها در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان خرید کالاهای اینترنتی، نیاز به حمل‌ونقل هوایی بار در مقابل روش‌های توزیع جاری (زمینی و دریایی) بیش از پیش احساس می‌شود؛ به‌طوری‌که طی سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به این حوزه شده است. یکی از چالش‌های موجود در یک شبکه توزیع هوایی مسئله مسیریابی برای ربات‌های بدون سرنشین با در نظر گرفتن افزایش رضایت مشتریان و محدودیت‌های شبکه و مشتریان می‌باشد. با توجه ضرورت و اهمیت مسیریابی برای ربات‌های پرنده بدون سرنشین در شبکه توزیع و خدمت‌رسانی به مشتریان، در این مقاله به بحث و حل مسئله فوق‌الذکر پرداخته شد. در ابتدای امر به معرفی مسئله مسیریابی، خدمت‌رسانی و مدل‌سازی پرداخته شد. همچنین به‌منظور ساده‌سازی و درک هرچه بهتر فرمولاسیون مدل ریاضی مسئله مسیریابی، معادلات ربات‌های پرنده جهت سرویس‌دهی به فرم فضای حالت بیان شد. پس از بیان روابط، پارامترهای مدل و ربات‌های پرنده بیان شد با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی ژنتیک مسیرهای بهینه استخراج شد. همچنین به‌منظور افزایش کارایی استراتژی پیشنهادی، روابط مصرف باتری ربات‌های پرنده بیان شد. پس از بیان روابط، نتایج

حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ارائه شد. مشاهده شد رویکرد پیشنهادی به‌خوبی توانسته کلیه نیازهای و اهداف مسئله را پاسخ دهد و می‌توان از آن در مسئله مسیریابی شبکه‌های هوایی با ابعاد بالا نیز بهره گرفت.

۸- مراجع:

[1] Dantzig GB, Ramser JH. The truck dispatching problem. Management science. 1959 Oct;6(1):80-91.

[2] Toth P, Vigo D, editors. Vehicle routing: problems, methods, and applications. Society for industrial and applied mathematics; 2014 Nov 24.

[3] Fazlollahtabar H, Saidi-Mehrabad M. Methodologies to optimize automated guided vehicle scheduling and routing problems: a review study. Journal of intelligent & robotic systems. 2015 Mar 1;77(3-4):525-45.

[4] Dror M, Laporte G, Trudeau P. Vehicle routing with split deliveries. Discrete Applied Mathematics. 1994 May 20;50(3):239-54.

[5] Toth P, Vigo D, editors. The vehicle routing problem. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2002 Jan 1.

[6] Cordeau JF, Laporte G, Savelsbergh MW, Vigo D. Vehicle routing. Handbooks in operations research and management science. 2005 Jan 1;14:367-428.

[7] Endler KD, Scarpin CT, Steiner MT, Choueiri AC. Systematic Review of the Latest Scientific Publications on the Vehicle Routing Problem. Asia-Pacific Journal of Operational Research. 2023 Mar 25:2250046.

[8] Berghman L, Kergosien Y, Billaut JC. A review on integrated scheduling and outbound vehicle routing problems. European Journal of Operational Research. 2023 Jan 2.

[9] Telli K, Kraa O, Himeur Y, Ouamane A, Boumehraz M, Atalla S, Mansoor W. A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (uavs). Systems. 2023 Aug 2;11(8):400.

[10] Cheng N, Wu S, Wang X, Yin Z, Li C, Chen W, Chen F. AI for UAV-Assisted IoT Applications: A Comprehensive Review. IEEE Internet of Things Journal. 2023 May 1.

[11] Khosravian E., Maghsoudi H., Design of an Intelligent Controller for Station Keeping, Attitude Control, and Path Tracking of a Quadrotor Using Recursive Neural Networks, International Journal of Engineering (IJE), IJE TRANSACTIONS B: Applications Vol. 32, No. 5, (May 2019) 747-758

[12] Piri, Erfan Khosravian Cham. “Design Optimal Adaptive Trajectory Tracking Control for Station Keeping and Attitude Control of Quadrotor Using Gray Wolf Optimization.”, Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University , Autumn 2022, Vol. 19, No. 3, p. 663-695

[13] Fu Z, Chow JY. The pickup and delivery problem with synchronized en-route transfers for microtransit planning. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2022 Jan 1;157:102562.

[14] Chabot T, Bouchard F, Legault-Michaud A, Renaud J, Coelho LC. Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2018 Feb 1;110:1-4.

[15] Chabot T, Bouchard F, Legault-Michaud A, Renaud J, Coelho LC. Service Level, Financial and Environmental Optimization of Collaborative Transportation. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport= Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation; 2017 Jul.

[16] Sharma A, Kumar R. Service-level agreement—energy cooperative quickest ambulance routing for critical healthcare services. Arabian Journal for Science and Engineering. 2019 Apr 1;44(4):3831-48.

[17] Nicol CE. A Robust Adaptive Neural Network Control for a Quadrotor Helicopter. University of Calgary, Department of Electrical and Computer Engineering; 2010 Jan.

[18] Nicol C, Macnab CJ, Ramirez-Serrano A. Robust adaptive control of a quadrotor helicopter. Mechatronics. 2011 Sep 1;21(6):927-38.

[19] Türkoğlu B, Eroğlu H. Genetic Algorithm for Route Optimization. InApplied Genetic Algorithm and Its Variants: Case Studies and New Developments 2023 Jul 2 (pp. 51-79). Singapore: Springer Nature Singapore.