



## مدیریت جریان ترافیک هوایی پروازهای ورودی با رویکرد MOGWO و NSGAI (مطالعه موردی: فرودگاه بین المللی مشهد)

### منیژه تیموری

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

هوشنگ تقی زاده (نویسنده مسؤول)

استاد گروه مدیریت صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

Email: taghizadeh@iaut.ac.ir

### محمود جعفر پور

دانشیار گروه ریاضی کاربردی، دانشگاه مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

### مرتضی هنرمند عظیمی

استادیار گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱ \* تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

### چکیده

مدیریت ترافیک هوایی یکی از مشاغل حساس و پراسترس است که همه‌روزه با مشکلات و موانع مختلفی روبه‌رو می‌شود و مسئله توالی هواپیما یکی از مهم‌ترین مسائلی است که این روزها در حوزه کاری مراقبت پرواز به آن پرداخته می‌شود. فرود آمدن زودتر یا دیرتر از زمان مشخص شده هزینه ای را برای هر پرواز به همراه دارد و تکنیک‌های موجود، فاکتورهای زمانی را اندازه‌گیری نمی‌کنند در نتیجه هزینه جریمه تأخیر بسیار بالا است و این در حالی است که تکنیک‌های فراوانی در جهت کاهش این جریمه وجود دارد بدین منظور در این مقاله مسئله فرود آمدن هواپیما بررسی شده و سپس به کمک یک تابع بهینه‌سازی مدلی جهت افزایش کارایی ارائه شده است، به‌طور کلی مشکل توالی وظایف تعیین ترتیب اجرای آن‌ها روی ماشین‌ها به‌منظور کاهش (یا افزایش) معیار موردنظر است. در مسئله‌ی بهینه‌سازی تعیین ترتیب عملیات ورود، هم در مقررات و هم در نشریات علمی موردتوجه است. در مراحل اولیه توالی ترافیک هوایی از مدیریت ورودی‌ها و نوبوری مبتنی بر ویژگی به‌منظور گسترش افق‌های طراحی استفاده می‌شود و امکان بررسی ترافیک را در هردو حالت بلند شدن و نشست هواپیما امکان‌پذیر می‌کند. لذا در این مقاله بر توالی فرود هواپیماها متمرکز است و این امر را با بررسی پارامترهایی مانند کاهش هزینه‌های پروان و پارکینگ، به حداقل رساندن زمان‌های تأخیر و زودرسی و همچنین حداقل کردن هزینه‌های مصرف سوخت انجام می‌دهد. در نهایت در این مقاله قصد بر این است با استفاده از الگوریتم‌های نظری تایید شده و تطبیق آن‌ها با چالش‌های موجود در زمینه زمان‌بندی روشی جدید جهت بهبود کیفیت برنامه‌های زمان‌بندی و کاهش زمان انجام آن به دست آورد در این راستا آزمایش‌های تجربی انجام گرفته روی مجموعه داده‌های فرودگاه بین المللی شهید هاشمی نژاد مشهد انجام گرفت و نتایج نشان داد که می‌توان با این روش بهتر به اهداف اصلی زمان‌بندی فرود هواپیما دست یافت.

**کلمات کلیدی:** ترافیک هوایی، مدیریت جریان، NSGAI, MOGWO

## ۱- مقدمه

از دیدگاه سیستماتیک مدیریت جریان ترافیک هوایی مجموعه‌ای از تکنیکها و ابزارهای مدیریتی، تحلیلی و عملیاتی است که به‌وسیله آن‌ها می‌توان جریان ترافیک را بهینه کرده و از ظرفیت سیستم پروازی موجود بهترین استفاده را به عمل آورد. افزایش تعداد پروازهای هوایی، یک چالش برای کنترل‌کنندگان ترافیک هوایی ایجاد کرده است. از این رو کنترل ترافیک هوایی باید به برنامه‌هایی بهتر برای فرود در زمان بندی هواپیماها مجهز شود. مشکل زمان بندی در بسیاری از محدوده‌های علمی، صنعتی و اقتصادی وجود دارد (Bahamian & Zamani, 2010).

برنامه‌ریزی فرود هواپیماهای ورودی به فرودگاه در صنعت هوانوردی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. ترتیب فرود هواپیماها در فرودگاه باید توسط مراقبت پرواز مشخص شود. برای اختصاص ترتیب فرود هواپیماها، می‌توان به محدودیت‌های جداسازی دو هواپیما اشاره نمود. در صورت رعایت نشدن این محدودیت، امکان بروز حادثه برای هواپیماهای متوالی وجود دارد. کمینه کردن تأخیرها، مهم‌ترین نتیجه‌ی مورد نظر در برنامه‌ریزی فرود هواپیماها است که همچنین منجر به کاهش هزینه‌های سوخت اضافه برای هواپیماها می‌شود. همچنین از ناراضی‌تی مسافران جلوگیری می‌کند. از آنجایی که این هزینه‌ها درصد قابل توجهی از هزینه‌های شرکت‌های هواپیمایی را تشکیل می‌دهند، لازم است که برنامه‌ریزی فرود هواپیماها مورد توجه شرکت‌های هواپیمایی مختلف قرار گیرد. برنامه‌ریزی مناسب فرود هواپیماها، منجر می‌شود که ظرفیت عملیاتی فرودگاه بیشتر شده، شرکت‌های فرودگاهی بتوانند در بازه زمانی ثابت، پذیرای تعداد بیشتری از هواپیماها باشند. همچنین می‌توان هواپیماهای بیشتری را به جایگاه پارک اختصاص داد و از این طریق درآمد فرودگاه را افزایش دهد (Safarzadei Hosseini & Etemadzadeh, 2013).

کنترل توالی هواپیماهای ورودی و تخصیص هواپیماها به ورودی‌های مسافری، دو موضوعی است که باید مورد توجه مدیریت فرودگاه‌ها قرار بگیرد. به طوری که هم درآمد افزایش یابد و هم مسافران از عملکرد مدیریتی فرودگاهی راضی باشند. بنابراین هواپیماها به محض فرود در فرودگاه باید به جایگاهی که برای پارک آن‌ها در نظر گرفته شده هدایت شوند، به طوری که آن جایگاه در لحظه‌ی فرود هواپیمای مذکور خالی و آماده‌ی سرویس دهی به هواپیما است (Lahejaneyan & Mohamadi, 2019). بنابراین زمان فرود هواپیماها به جایگاه پارک اختصاصی به هواپیما مؤثر است و یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه کاری مراقبت پرواز برنامه‌ریزی و توالی فرود هواپیماهای ورودی است که هدف کمینه‌سازی تأخیر میان توالی فرود هواپیماهاست. در تعیین ترتیب ورود پروازها انتخاب باند مناسب فرود (در فرودگاه‌هایی که چند باند برای فرود وجود دارد) برای کاهش تأخیر پروازی، فاصله زمانی فرود<sup>۱</sup> (LTI) را در نظر می‌گیرند که حداقل زمان جدایی قابل قبول برای دو پرواز ورودی پشت سر هم به یک باند پروازی را نیز شامل می‌شود. اساساً فاصله زمانی فرود هواپیما یک کمیت تغییرپذیر است زیرا:

- برای حفظ ایمنی پروازها لازم است که دو پرواز دارای حداقل جدایی طولی بر اساس نوع هواپیما و موقعیت واقعی آن‌ها باشند.

سرعت و نوع<sup>۲</sup> هواپیماهای در حال فرود متفاوت است.

تسهیلات و تجهیزات هر باند پروازی، بر روی تعیین زمان LTI تأثیرگذار است (Xu, 2017).

مسئله زمان بندی فرود هواپیما یا به اختصار ALP<sup>۳</sup> عبارت است از ایجاد صف بین هواپیماهایی که برای نشستن به فرودگاه می‌آیند و اختصاص زمان نشستن به هر هواپیما و اعمال ایجاد استاندارد بین پروازها با توجه به تعدد محدودیت‌های عملیاتی موجود. یک راه ساده برای برنامه‌ریزی و ایجاد صف بین پروازهای ورودی به یک فرودگاه تک بانده استفاده از روش FCFS<sup>۴</sup> می‌باشد که زمانی را به نشستن هواپیما اختصاص می‌دهد. این زمان زودترین زمانی است که هر هواپیما می‌تواند در آن زمان

<sup>۱</sup> Landing Time Interval

<sup>۲</sup> Type

<sup>۳</sup> Aircraft landing problem

<sup>۴</sup> First Come First Service

بنشینند اما تحقیقات نشان داده است که این زمان به ندرت می تواند بهترین جواب مسئله را در مورد ظرفیت باند یا حتی میانگین تأخیر پروازها ارائه دهد.

هدف از انجام تحقیق حاضر اختصاص زمان نشستن به یک پرواز با توجه به موقعیت پرواز در تعدادی از پروازهای ورودی به فرودگاه، با توجه به جدایی استاندارد لازم بین پروازها بر اساس نوع آنها است. به طوری که زمان واقعی نشستن هواپیما با زمان پیش بینی شده برای نشستن هواپیما کمترین انحراف را داشته باشد. بدین ترتیب با استفاده از حداکثر ظرفیت باند و حداکثر استفاده از ظرفیت فرودگاه و می نیمم نمودن زمان تاخیرات بین پروازهای ورودی نقطه بهینه در مسئله زمان بندی فرود هواپیما حاصل گردد. در این تحقیق تمرکز بر روی برنامه ریزی حالت استاتیک پروازهای ورودی می باشد. با توجه به تغییرات محیط عملیاتی و متغیر با زمان بودن این شرایط، حالت دینامیک مسئله به وجود می آید که لازم می شود تا تصمیم گیری ها به طور مداوم مورد تجدیدنظر قرار گیرند که یافتن پاسخ بهینه مسئله به دلیل پیچیدگی این شرایط دشوار می نماید. کارشناسان خبره در مدیریت جریان ترافیک هوایی همواره به دنبال بالا بردن کارایی و بهره وری بوده اند.

برای افزایش ظرفیت فرودگاهها دو راهکار اساسی پیش رو است که اولین راهکار ساخت فرودگاه جدید و گسترش باندها و تاکسی وی های پروازی، افزایش تجهیزات ناوبری و کمک ناوبری، تغییرات در راه های هوایی، استفاده از تجهیزات ماهواره ای پیشرفته تر، تجهیز ناوگان هواپیمایی که مستلزم صرف هزینه های بالا و صرف زمان طولانی جهت تحقیقات مربوط به سایت یابی فرودگاه بوده و اصولاً افق زمانی آن طولانی مدت است. دومین راهکار استفاده بهینه از ظرفیت و تجهیزات فرودگاه های موجود با بهینه سازی میزان ظرفیت باند و در نتیجه ظرفیت فرودگاه در راستا مدیریت جریان ترافیک هوایی است، که کنترلرهای ترافیک هوایی دو هدف مهم را دنبال می کنند، هدف اول حفظ ایمنی پروازها و هدف دوم تسریع جریان ترافیک هوایی و کاهش تأخیر پروازی است. کاهش تأخیر پروازها جدا از شعار احترام به مشتری یک هدف مهم را در پی خواهد داشت و آن صرفه جویی اقتصادی است (Ng, Lee, Chan & Qin, 2017).

با توجه به آمار انجمن بین المللی فرودگاهها مشخص شد که کل هواپیماهای ورودی در یک منطقه رادار فرودگاهی به طور قابل توجهی بالا بوده و این امر نیاز به یک مدیریت قوی برای برنامه ریزی فرود این هواپیماها دارد. مسئله تصمیم گیری که کنترلرهای فرودگاهی بارها پیوسته با آن روبرو می شوند این است که هواپیمایی که در نوبت فرود بعدی است کدام است و چه زمانی فرود می آید؟ در کاربردهای واقعی، معمولاً پیدا کردن بهترین راه حل هدف اصلی نیست بلکه یافتن راه حل عملی برای مسئله فرود در زمان مناسب نیز می تواند کافی باشد. مشکل فرود هواپیماها یکی از حوزه های مهم در عملیات ترافیک هوایی است، مدل سازی و حل این مسئله می تواند کمک شایان توجهی در مدیریت ترافیک هوایی باشد. مسئله زمان بندی فرود هواپیماها محدودیت های زیادی دارد از این رو به عنوان یک مسئله NP-hard شناخته می شود. برای مثال، هواپیما باید در یک بازه زمانی مشخص فرود بیاید و بهترین زمان بین هر جفت فرود باید بررسی شود. پیدا کردن جواب بهینه به دلیل ویژگی های مربوط به اندازه بزرگ و همچنین تعداد زیادی از محدودیت ها در مسئله زمان بندی فرود هواپیما، بسیار مشکل است. یکی از عوامل کلیدی در تعیین جواب مسئله، حداقل فاصله جدایی مورد نیاز بین هواپیماها جهت تضمین ایمنی پروازها در هنگام فرود است. بنابراین، حداقل فاصله میان فرود بر روی هواپیماهای جلویی و عقبی و نیز توجه به نوع هواپیماها باید در راه حل ارائه شده برای مرتب سازی و زمان بندی هواپیماها گنجانده شود. بنابراین، این مشکل از دیدگاه محققین مختلف اهمیت زیادی دارد و تاکنون بیشتر مطالعات بر روی آن به منظور ارائه الگوریتم ها و مدل ها برای افزایش ظرفیت فرودگاه انجام شده است.

در این تحقیق ارائه الگوریتمی کارا و جدید در حل مسائل بهینه سازی برای حل مسئله توالی پروازها موجب کاهش هزینه های بیلیون دلاری شرکت های هواپیمایی خواهد شد و در پژوهش حاضر به بررسی مدیریت جریان ترافیک هوایی با استفاده از الگوریتم MOGWO و NSGAI می پردازیم

در مقاله حاضر با استفاده از الگوریتم گرگ‌های خاکستری چندهدفه<sup>۵</sup> به حل مسئله زمان‌بندی فرود هواپیماها (ALP) پرداخته شده و نتایج حاصل با الگوریتم<sup>۶</sup> مقایسه گردد. همچنین تابع هدف اول مسئله با الگوریتم‌های فرا ابتکاری گرگ خاکستری<sup>۷</sup>، گرگ خاکستری بهبودیافته<sup>۸</sup> ازدحام ذرات<sup>۹</sup> و کرم شبتاب<sup>۱۰</sup> مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این منظور پیش از ارائه روش پیشنهادی، شرایط حصول راه حل و همچنین الزامات و پارامترهای مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) متغیرهای تصمیم‌گیری

$SLT_i$ : زمان فرود برنامه‌ریزی شده‌ی هواپیمای  $i$  که پس از ورود هواپیما به محدوده رادار محاسبه می‌شود.  
 $n$ : تعداد هواپیماهایی که باید برنامه‌ریزی شوند.

$ELT_i$ : زمان انتظار (یا هدف) فرود هواپیمای  $i$  بر اساس اسلات زمانی تعیین شده که معمولاً در برنامه پرواز مشخص شده است.

$TELT_i$ : نوع هواپیمای  $i$  در مقیاس اندازه‌گیری بر اساس سه نوع مختلف هواپیما کوچک، متوسط و بزرگ.

$\Delta_{ij}$ : حداقل فاصله زمانی بین هواپیما  $i$  و  $j$ ، اگر فرود هواپیمای  $i$  قبل از هواپیمای  $j$  باشد.

$CAT_i$ : هزینه هواپیمایی در هر واحد زمان (به‌جز عامل سوخت) برای فرود پس از  $ELT_i$  برای هواپیمای  $i$ .

$CBT_i$ : هزینه هواپیمایی در هر واحد زمان (به‌جز عامل سوخت) برای فرود قبل از  $ELT_i$  برای هواپیمای  $i$ .

$FCD_i$ : میانگین سوخت موردنیاز در هر دقیقه برای هواپیمای  $i$  برای فرود پس از  $ELT_i$ .

$FCA_i$ : میانگین سوخت موردنیاز در هر دقیقه برای هواپیمای  $i$  برای فرود قبل از  $ELT_i$ .

$Th$ : زمان لازم برای برنامه‌ریزی یک حلقه در زمان انتظار برای فرود.

$ea_i$ : زودرسی مجاز برای فرود قبل از  $ELT_i$  برای هواپیما  $i$ ، از لحظه‌ای که چرخ‌ها زمین را لمس می‌کنند تا رسیدن به محوطه پارکینگ (شامل عبور از جاده‌ی هواپیما رو در فرودگاه<sup>۱۱</sup>).

$da_i$ : دیررسی مجاز برای فرود بعد از  $ELT_i$  برای هواپیما  $i$ ، از لحظه‌ای که چرخ‌ها زمین را لمس می‌کنند تا رسیدن به محوطه پارکینگ (شامل عبور از جاده‌ی هواپیما رو در فرودگاه).

ب) توابع هدف

در مسئله‌ی چندهدفه تابع هدف ابتدا به‌صورت زیر بیان می‌شود:

توابع هدف شامل معیارهایی است که در مسئله زمان‌بندی هواپیماها به دنبال بهینه کردن آن‌ها هستیم. این توابع هدف عبارت‌اند از:

حداکثر کردن بازده باند فرودگاه: به‌جای حداکثر کردن تعداد هواپیماهایی که در باند فرود می‌آیند، می‌توان کل دفعات فرود را به‌طور مساوی کاهش داد. این همان بازده باند فرودگاه است.

$$\min_{i=1}^n |SLT_i - ELT_i| \quad (۱)$$

کاهش هزینه‌های اپرن و پارکینگ و سایر هزینه‌هایی که به دلیل ماندن اضافی هواپیما در فرودگاه با به حداقل رساندن تأخیر زمان و زود رسیدن مجاز به خطوط هوایی اعمال می‌شود.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \{|SLT_i - ELT_i| - B\} A \quad (۲)$$

<sup>5</sup> Multiple- objective Grey Wolf Optimization (MOGWO)

<sup>6</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII)

<sup>7</sup> GWO

<sup>8</sup> IGWO

<sup>9</sup> PSO

<sup>10</sup> FA

<sup>11</sup> taxiways

که در آن

$$A \begin{cases} CAT_i, & \text{if } SLT_i > ELT_i \\ 0, & \text{if } SLT_i = ELT_i \\ CBT_i, & \text{if } SLT_i < ELT_i \end{cases} \quad B \begin{cases} da_i, & \text{if } SLT_i > ELT_i \\ 0, & \text{if } SLT_i = ELT_i \\ ea_i, & \text{if } SLT_i < ELT_i \end{cases} \quad (3)$$

به حداقل رساندن هزینه مصرف سوخت و به حداقل رساندن آلودگی دی اکسید کربن هوا: مصرف سوخت بستگی به عوامل مختلف از جمله تکنیک پرواز خلبان، ارتفاع، سرعت باد، مدل هواپیما، وزن هواپیما (شامل وزن و بار مسافر) و سوخت داخل مخازن بستگی دارد و در نتیجه، هزینه سوخت اضافی ناشی از دیررسی و صرفه جویی در هزینه سوخت به دلیل ورود زود هنگام باید مورد توجه قرار گیرد:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \{SLT_i - ELT_i\} C \quad (4)$$

که در آن:

$$C \begin{cases} FCD, & \text{if } SLT_i > ELT_i \\ 0, & \text{if } SLT_i = ELT_i \\ FCA, & \text{if } SLT_i < ELT_i \end{cases} \quad (5)$$

در مسئله تک هدفه تابع هدف به صورت زیر تعیین می شود:

هدف تخصیص دادن یک برنامه‌ی زمان بندی فرود برای هر هواپیما است به طوری که تابع هدف این مسئله در مواجهه با شرایط داده شده، کمینه شود. قیود این مسئله با توجه به زودترین زمان ممکن و دیرترین زمان ممکن برای فرود در نظر گرفته می شود. می توان به کمک بهینه سازی قدر مطلق میان زمان فرود پیش بینی شده با زمان از پیش تعیین شده و با در نظر گرفتن شرایط مذکور مسئله را حل نمود. با کمینه سازی این هدف با توجه به مقاله مختار موسوی، رهامی و کاوه (۲۰۱۵) نیز به هدف کمینه سازی زودرسی و دیررسی هواپیماها دست خواهیم یافت. در نتیجه هزینه های اضافی مربوط به سوخت و غیر سوخت ( نظیر هزینه پارکینگ )، ناشی از تأخیر یا زود فرود آمدن هواپیماها کاهش می یابد. با توجه به توضیحات گفته شده، تابع هزینه را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\min \sum_{i=1}^n |SLT_i - ELT_i| \quad (6)$$

که در آن  $n$ ، تعداد هواپیماهایی است که باید به کمک این تابع هزینه زمان بندی فرود آن ها تعیین شود. محدودیت های عملیاتی مختلفی برای مسئله زمان بندی فرود هواپیما وجود دارد. با نگاهی به دنیای واقعی به عملی ترین آن ها برای استفاده در یک باند اشاره شده است. به طور کلی تمام زمان های فرود برنامه ریزی شده (SLT)، باید بر اساس محدودیت های زیر تعیین و محاسبه شود. محدودیت های استفاده از باند: هر باند تنها می تواند توسط یک هواپیما در یک زمان مشخص استفاده شود، بنابراین هواپیمای  $i$  قبل از هواپیمای  $j$  یا برعکس فرود می آید:

$$X_{ij} + X_{ji} = 1, \forall ij = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

که در این رابطه اگر هواپیمای  $i$  قبل از  $j$  فرود آید،  $X_{ij} = 1, X_{ji} = 0$  در غیر این صورت اگر هواپیمای  $j$  قبل از  $i$  فرود آید،  $X_{ij} = 0, X_{ji} = 1$  خواهد شد.

این شرط متضمن این است که تحت هیچ شرایطی به دو هواپیما یک زمان فرود خاص اختصاص نخواهد یافت. در صورت بروز چنین مسئله ای برنامه دوباره یک زمان دیگر برای فرود هواپیماها محاسبه می کند تا زمانی که این شرط برقرار شود.

حد تضمین حداقل فاصله جدایی: هواپیمای پشت سری باید حداقل فاصله جدایی از هواپیمای جلویی خود داشته باشد

تا از قرار گرفتن در اغتشاشات ایجاد شده در پشت سر هواپیمای جلویی (WT) اجتناب گردد.

$$(SLT_i - SLT_j) \geq \Delta_{ij} \quad (۸)$$

که در آن  $SLT_i$  زمان فرود پیش‌بینی شده برای هواپیمای  $i$  ام و  $SLT_j$  زمان فرود پیش‌بینی شده برای هواپیمای  $j$  ام است. عبارت  $\Delta_{ij}$  نشان‌دهنده حداقل فاصله جدایی<sup>۱۲</sup> موردنیاز برای فرود ایمن بین هواپیمای  $i$  و  $j$  است. برقراری این شرط، به اندازه و وزن هواپیمای  $j$ ،  $i$  بستگی دارد.

الف) محدودیت‌ها

انواع گوناگونی از محدودیت‌های عملیاتی برای ALP وجود دارد؛ با نگاهی به دنیای واقعی، عملی‌ترین آن‌ها برای استفاده در یک باند، در زیر آمده است. تمام زمان‌های فرود برنامه‌ریزی شده (SLT) باید بر اساس محدودیت‌های زیر تعیین و محاسبه شود:

• محدودیت‌های استفاده از باند

$$X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad \forall ij = 1, 2, \dots, n \quad (۸)$$

هر باند تنها می‌تواند توسط یک هواپیما در یک زمان استفاده شود. بنابراین، هواپیما  $i$  قبل از هواپیمای  $j$  یا برعکس فرود می‌آید.

حد تضمین حداقل فاصله جدایی

$$(SLT_i - SLT_j) \geq \Delta_{ij} \quad (۹)$$

هواپیما باید در فاصله‌ای امن از هواپیماهای دیگر باشد تا از ایجاد آشوب و تلاطم در هوا جلوگیری شود.

ب) ساختار زمان‌بندی

روش پیشنهادی تلاش دارد تا با استفاده از بهینه‌سازی با الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه زمان‌بندی بهینه را ارائه کند. زمان‌بندی توسط الگوریتم گرگ خاکستری نیاز به ساختاری برای ارائه زمان‌بندی دارد. این ساختار پایه تمامی محاسبات صورت گرفته در این الگوریتم است. از این رو پیش از هر چیز به ارائه این ساختار پرداخته می‌شود. جهت زمان‌بندی مجموعه‌ای حاوی  $n$  هواپیما از آرایه‌ای با طول  $n$  استفاده می‌کنیم که محتوای هر سلول عددی خواهد بود که زمان فرود هواپیما خواهد بود. در واقع مقدار داده قرار گرفته در سلول  $i$  نشان‌دهنده زمان  $SLT_i$  است که زمان فرود هواپیمای  $i$  است. برای تشریح بهتر این موضوع فرض کنید مجموعه‌ای شامل ۱۰ هواپیما برای زمان‌بندی موجود باشد. یک زمان‌بندی این مجموعه داده همانند جدول شماره (۱) می‌تواند باشد.

جدول شماره (۱): زمان‌بندی ۱۰ هواپیما

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱۰:۱۲	۱۰:۲۱	۱۰:۳۰	۱۰:۱۸	۱۰:۲۴	۱۰:۳۷	۱۰:۴۰	۱۰:۳۱	۱۰:۵۰	۱۰:۴۵

بر اساس جدول شماره (۱)، مشاهده می‌شود که با این ساختار توان ایجاد زمان‌بندی‌های متفاوتی وجود دارد به‌طور مثال فرود هواپیمای شماره ۸ برای ساعت ۱۰:۳۱ زمان‌بندی شده است.

ج) زمان‌بندی با الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه

در روش پیشنهادی از الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه به منظور زمان‌بندی استفاده می‌شود. جهت تبدیل الگوریتم گرگ خاکستری تک هدفه به چندهدفه یک جزء جدید به ساختار الگوریتم گرگ خاکستری اضافه می‌شود. این جزء شبیه به جز به کار گرفته شده در الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه است. این جزء یک آرشیو است که مسئول ذخیره جواب‌های نامغلوب است. برای تشریح لزوم وجود این عنصر باید ذکر شود که در زمانی که بیش از یک هدف در مسئله مورد توجه است، ایجاد ترتیب برای اولویت‌بندی جواب‌های به دست آمده به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. برای درک بهتر این مسئله فرض کنید دو هدف  $O_1$  و  $O_2$  برای مسئله‌ای مفروض باشد که در هر دو هدف مقدار کمتر بهتر است. حال چنانچه در این مسئله دو جواب  $S_1$  و  $S_2$  وجود داشته باشد و برای جواب  $S_1$  مقادیر اهداف برابر با ۱۰ و ۸ و برای جواب  $S_2$  مقادیر اهداف ۷ و ۱۱ باشد چگونه می‌توان تشخیص داد که کدام یک از این جواب‌ها نسبت به دیگری برتری دارد؟ زیرا در مورد هدف  $O_1$  جواب  $S_2$  نسبت به جواب  $S_1$

<sup>12</sup> Minimum Separation

بہتر اما در مورد هدف O2 این جواب S1 است که نتیجہ بہتری را نشان می‌دهد. از این‌رو در مسائل چندهدفہ ممکن است در میان دو جواب هیچ‌یک نتواند دیگری را مغلوب نماید.

آرشیو یک مکان ذخیرہ و بازیابی جواب‌های نامغلوبی است کہ تاکنون بہ‌دست‌آمده است. در طی فرآیند تکرار الگوریتم، یک جواب بہ‌دست‌آمده با اعضای فعلی آرشیو مقایسہ می‌شود کہ یکی از سہ حالت زیر اتفاق خواهد افتاد:

- عضو جدید توسط حداقل یکی از اعضای آرشیو مغلوب می‌شود. در این حالت جواب جدید اجازه اضافه شدن بہ آرشیو را نخواهد داشت.

عضو جدید یک یا چند عضو از اعضای آرشیو را مغلوب می‌کند. در این حالت اعضای مغلوب شدہ از آرشیو حذف شدہ و عضو جدید وارد آرشیو می‌شود.

اگر عضو جدید و اعضای آرشیو هیچ‌یک موفق نشوند دیگری را مغلوب کنند عضو جدید بہ آرشیو اضافه خواهد شد.

چنانچہ آرشیو پر شدہ باشد عضوی با کمترین فاصلہ ازدحامی حذف می‌شود تا برای عضو جدید فضا باشد.

در تکرار اول، عدم امکان ایجاد ترتیب برای گرگ‌های خاکستری باعث می‌شود تا نتوان گرگ‌های الف، بتا و دلتا را بہ راحتی تعیین کرد. از این‌رو برای تعیین این گرگ‌ها کہ نقش اساسی در معادلات بہ کار گرفتہ شدہ در الگوریتم گرگ خاکستری را دارند نیاز است تا این گرگ‌ها بہ تصادف از آرشیو انتخاب شوند. پیش از ارائه فلوجارت روش پیشنهادی با استفادہ از الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفہ، لازم است تا بہبودهای در نظر گرفتہ شدہ بہ‌منظور افزایش کارایی روش گرگ خاکستری ارائه گردد.

(د) استراتژی انتخاب رهبر

در الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفہ بہ علت عدم امکان تعیین ترتیب میان گرگ‌ها انتخاب رهبر بہ صورت تصادفی انجام می‌شود. اما انجام این کار می‌تواند بر روند این الگوریتم تأثیر منفی بگذارد. در روش پیشنهادی بہ‌منظور ارتقاء عملکرد این فرآیند از تکنیکی مبتنی بر ترکیب گرید و چرخ رولت استفادہ می‌شود. در الگوریتم گرگ خاکستری سہ جواب برتر بہ‌عنوان رهبر انتخاب می‌شوند کہ عبارت‌اند از گرگ الف، بتا و دلتا. وظیفہ رہبران ہدایت دیگر جستجوگران بہ سمت منطقہ ای است کہ امیدوارند تا بتوانند جواب‌هایی نزدیک بہ جواب بہینہ را آنجا بیابند. با توجہ بہ وجود آرشیو در فضای جستجوی چندهدفہ انتخاب رهبر کار سادہ ای نیست و اصولاً مکانیزم انتخاب رهبر برای این موضوع توسعہ یافته است. در روش پیشنهادی ابتدا آرشیو گرید بندی می‌شود، بدین معنا کہ آرشیو در ہر بعد از ہدف بہ بخش‌های مساوی تقسیم می‌شود تا فضای آرشیو حالتی گرید مانند بگیرد. از این‌رو ہر بخش حاوی تعداد خاصی از جواب‌های نامغلوب می‌باشد. پس از آن، نوبت بہ انتخاب رهبر با استفادہ از چرخ رولت است. مکانیزم انتخاب رهبر از میان بخش‌هایی با کمترین ازدحام در آرشیو یکی از جواب‌های نامغلوب را بہ‌عنوان گرگ الف، بتا و دلتا انتخاب می‌کند. انتخاب بہ وسیلہ چرخ رولت با احتمال زیر خواهد بود:

$$P_i = \frac{C}{N_i} \quad (10)$$

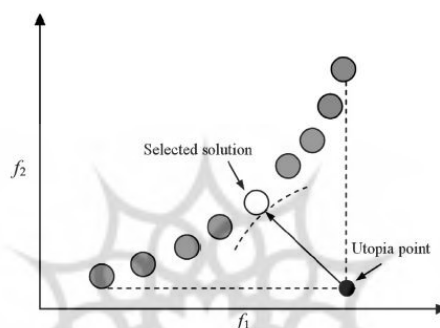
در این معادلہ C یک مقدار ثابت بزرگتر از یک است و N تعداد جواب‌های نامغلوب در قسمت I است. در این معادلہ مشخص است کہ بخش‌هایی با ازدحام کمتر، شانس انتخاب رهبر بالاتری را دارند. بدین ترتیب حتی مکان‌های با ازدحام کمتر نیز مورد جستجو قرار می‌گیرند تا بہ ہمہی اعضا شانس مساوی برای انتخاب شدن بہ‌عنوان رهبر دادہ شود. لازم بہ ذکر است کہ در زمان تعیین رهبر بایستی توجہ شود کہ هیچ‌یک از دو رهبر الف، بتا و دلتا یکسان نباشند. بنابراین بہ‌عنوان مثال وقتی الف تعیین شد، موقتاً از آرشیو کنار گذاشتہ می‌شود تا دوبارہ انتخاب نگردد. با استفادہ از این تکنیک در واقع تلاش می‌شود تا گرگ‌ها بہ سمتی بروند کہ کمتر مورد جستجو قرار گرفتہ است از این‌رو می‌توان امیدوار بود کہ فضای جستجو بہ خوبی مورد بررسی قرار بگیرد و ہمگرایی حاصل شود.

ه) نحوه حذف از آرشیو پر

زمانی که آرشیو پر می شود، به دلیل پر شدن حافظه، باید برخی از اعضای آرشیو حذف شوند این عمل توسط عملگر درپچه انجام می شود. جزء درپچه وظیفه دارد تا آرشیو جوابها را تا حد ممکن همگرا نگه دارد و فضای کافی برای جوابهای جدید ایجاد کند. در این روش از فضای هدف که توسط گرید به چندین منطقه تقسیم شده است، منطقه ای با بیشترین ازدحام جوابها انتخاب شده و یکی از جوابها به تصادف انتخاب شده و حذف می شود تا برای جواب جدید فضای لازم باز شود.

و) انتخاب بهترین جواب از آرشیو

همانطور که در بخش قبل بیان شد، خروجی نهایی الگوریتم گرگ خاکستری مجموعه ای از جواب است. هر جواب نیز دارای میزان برازندگی است که توسط دیگر جوابها مغلوب نشده است از این رو نمیتوان به سادگی تنها یک جواب را به عنوان جواب نهایی از آرشیو انتخاب کرد. در این روش فاصله هر یک از جوابهای داخل آرشیو با نقطه ایده آل محاسبه می شود و نزدیکترین نقطه به نقطه ایده آل به عنوان جواب برگردانده می شود. این تکنیک با نام UtopiaPoint شناخته می شود.



شکل شماره (۱): نحوه تعیین نقطه بهینه و بهترین جواب از آرشیو

در ادامه الگوریتم روش پیشنهادی که مبتنی بر الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه است قابل مشاهده است. در این الگوریتم لیستی از پروازهایی که قرار است زمان بندی شود به عنوان ورودی به سیستم وارد می شود و سپس خروجی سیستم زمان بندی انجام شده است:

۱. شروع

۲. اطلاعات پروازهایی که قرار است زمان بندی شود را دریافت کن ← Flights Current

۳. جمعیت گرگهای خاکستری را با مقادیر مختلف SLT با توجه به مقدار دهی اولیه کن به نحوی که محدودیت ها را رعایت کند.

۴. مقادیر  $A$ ,  $a$ , و  $C$  را مقدار دهی اولیه کن.

۵. مقادیر هدف را برای هر یک از عامل های جستجو تعیین کن.

۶. جوابهای نامغلوب را پیدا کن و در آرشیو قرار بده.

۷.  $X_\alpha$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.

۸.  $X_\alpha$  را به صورت موقت از آرشیو بیرو کن تا از انتخاب رهبر مشابه با  $X_\alpha$  اجتناب شود.

۹.  $X_\beta$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.

۱۰.  $X_\beta$  را به صورت موقت از آرشیو بیرو کن تا از انتخاب رهبر مشابه با  $X_\beta$  اجتناب شود.

۱۱.  $X_\delta$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.

۱۲.  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , و  $X_\delta$  را به آرشیو برگردان.

۱۳.  $t = 1$

۱۴. تا زمانی که  $t$  کمتر از حداکثر تکرار است مراحل زیر را انجام بده:

۱۴.۱. به ازای هر عامل جستجو



- ۱۴.۱.۱. SLT عامل جستجو را به روز کن.
- ۱۴.۱.۲. اگر SLT جدید محدودیت ها را رعایت می کند گرگ جدید را جایگزین کن.
- ۱۴.۲. مقادیر A, a, و C را بروز کن.
- ۱۴.۳. مقادیر هدف را برای هر یک از عامل های جستجو تعیین کن.
- ۱۴.۴. جواب های نامغلوب را پیدا کن
- ۱۴.۵. آرشیو را با توجه به جواب های نامغلوب به دست آمده بروز رسانی کن.
- ۱۴.۶. اگر آرشیو پر شده است:
- ۱۴.۶.۱. مکانیزم بخش بندی را اجرا کن و یکی از اعضای فعلی آرشیو را حذف کن.
- ۱۴.۶.۲. جواب جدید را به آرشیو اضافه کن.
- ۱۴.۷.  $X_{\alpha}$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.
- ۱۴.۸.  $X_{\alpha}$  را به صورت موقت از آرشیو بیرون کن تا از انتخاب رهبر مشابه با  $X_{\alpha}$  اجتناب شود.
- ۱۴.۹.  $X_{\beta}$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.
- ۱۴.۱۰.  $X_{\beta}$  را به صورت موقت از آرشیو بیرون کن تا از انتخاب رهبر مشابه با  $X_{\beta}$  اجتناب شود.
- ۱۴.۱۱.  $X_{\delta}$  را با استفاده از استراتژی انتخاب رهبر از آرشیو انتخاب کن.
- ۱۴.۱۲.  $X_{\alpha}, X_{\beta},$  و  $X_{\delta}$  را به آرشیو برگردان.
- ۱۴.۱۳.  $t = t+1$
۱۵. جواب نهایی را با استفاده از تکنیک UtopiaPoint از آرشیو برگردان.

(ز) زمان بندی با الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته

در روش پیشنهادی از الگوریتم فرا ابتکاری گرگ خاکستری بهبود یافته<sup>۱۳</sup> به منظور زمان بندی استفاده می شود. الگوریتم (GWO<sup>۱۴</sup>) یک الگوریتم فرا ابتکاری است که از ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ ها در هنگام شکار الهام گرفته است. این الگوریتم مبتنی بر جمعیت بوده، فرایند تنظیمات ساده ای داشته و به سادگی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارد. الگوریتم گرگ خاکستری توسط میر جلیل و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شد. با توجه به نتایج به دست آمده در این الگوریتم توانایی استخراج بیشتری در مقابل با الگوریتم های تکامل تفاضلی (DE<sup>۱۵</sup>) بهینه سازی توده ذرات (PSO<sup>۱۶</sup>) از خود نشان داده است، همچنین توانایی فرار از بهینه محلی بیشتری دارد و در هر دو مسئله مقید و نامقید عملکرد بالایی داشته است. بنابراین در این تحقیق این الگوریتم مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ ها در حین فرایند شکار به صورت ریاضی مدل شده و برای طراحی الگوریتمی برای بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

(الف) مدل سازی ساختار سلسله مراتبی (هرم قدرت)

بهینه سازی با استفاده از گرگ های آلفا، بتا و دلتا انجام می شود. یک گرگ به عنوان آلفا هدایت کننده اصلی الگوریتم فرض می شود و یک گرگ بتا و دلتا نیز مشارکت دارند و بقیه گرگ ها به عنوان دنبال کننده آنها محسوب می شوند.

(ب) مدل سازی فرایند احاطه کردن شکار

دو رابطه مدل کننده:

$$D = \left| C X_p(t) - X(t) \right|, C = c_1 r_2, \quad (11)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A D, A = 2a(t)r_1 - a(t), \quad (12)$$

<sup>13</sup> Improve Grey Wolf Optimization

<sup>14</sup> Gray wolf algorithm

<sup>15</sup> Differential algorithm

<sup>16</sup> Particle swarm optimization

که در آن  $A, C, X_p$  بردارهای ضرایب،  $X_p$  بردار موقعیت مکانی شکار و  $X$  بردار موقعیت مکانی هر یک از گرگ‌ها است و  $t$  شماره تکرار است. که در آن مؤلفه‌های  $a$  به صورت خطی و در طی تکرارهای متوالی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابند و  $I_1$  و  $I_2$  بردارهای تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند.

(ج) مدل سازی فرایند شکار

گرگ‌های خاکستری توانایی تخمین موقعیت شکار را دارند. برای مدل سازی ریاضی این فرایند به ترتیب زیر عمل می‌شود: در جستجوی اولیه هیچ ایده‌ای در مورد موقعیت شکار وجود ندارد. فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا دانش اول بهتری در خصوص موقعیت شکار (نقطه بهینه جواب)، دارند. موقعیت این سه کاندیدای جواب به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$D = |C_1 X(t) - X(t)|, X_1 = X \quad A_1 D \quad ; \quad (13)$$

$$D = |C_2 X(t) - X(t)|, X_2 = X \quad A_2 D \quad ; \quad (15)$$

$$D = |C_3 X(t) - X(t)|, X_3 = X \quad A_3 D \quad (14)$$

$$X(t-1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (15)$$

یک الگوریتم گرگ خاکستری اصلاح یافته به منظور آستانه گذاری چند سطحی ارائه شده است که در آن موقعیت جدید گرگ‌ها در معادله (۳-۱۷) به کمک ضرایب وزنی به صورت معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$\vec{X}(t-1) = w_1 \cdot \vec{X}_1 + w_2 \cdot \vec{X}_2 + w_3 \cdot \vec{X}_3 \quad (16)$$

که  $w_1, w_2, w_3$  وزن‌های مربوطه می‌باشند که به وسیله معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$w_1 = \frac{f_1}{F}, w_2 = \frac{f_2}{F}, w_3 = \frac{f_3}{F} \quad (17)$$

که  $f_1, f_2, f_3$  نشان دهنده مقدار تابع هدف مسئله می‌باشند و  $F=f_1+f_2+f_3$  است. در این تحقیق اصلاح اصلی GWO اعمال ضرایب وزنی (۱۷) به معادله بروزرسانی عوامل جستجو است. با توجه به اینکه برای هر گرگ تابع برازندگی متفاوتی به دست می‌آید، قرار دادن وزن به صورت معادله (۱۷) منجر به افزایش دقت الگوریتم خواهد شد.

به منظور بهبود در جستجوی سراسری و محلی الگوریتم یک سری جستجوهای تصادفی حول موقعیت به دست آمده از هر سه گرگ آلفا و بتا و دلتا با توجه به معادله (۱۸) انجام می‌شود. به این صورت که یک عدد تصادفی در نظر گرفته می‌شود اگر این عدد بزرگ‌تر از  $0.4$  باشد معادله (۱۸) اجرا می‌شود و اگر این عدد بین  $0.1$  تا  $0.4$  باشد معادله (۱۸) زیر اجرا می‌شود:

$$\vec{X}(t-1) = w_1 \cdot \vec{X}_1 + w_2 \cdot \vec{X}_2 + w_3 \cdot \vec{X}_3 + (2 \text{randi}(5) - 5) \quad (18)$$

در معادله (۱۸) یک عدد تصادفی صحیح از یک الی ۵ به کمک دستور Randi محاسبه می‌شود. در نتیجه در پرانتز یک عدد بین  $-3$  و  $5$  خواهیم داشت. در غیر این صورت اگر کوچک‌تر از  $0.1$  باشد، معادله (۱۹) اجرا می‌شود.

$$\vec{X}(t-1) = w_1 \cdot \vec{X}_1 + w_2 \cdot \vec{X}_2 + w_3 \cdot \vec{X}_3 + (a) \text{randn}(1, n \text{Var}), \quad (19)$$

که  $\text{randn}$  یک عبارت تصادفی با موقعیت جدید جمع شده و با ضریب  $a$  جستجوی الگوریتم کنترل می‌شود. در حالی که  $a$  بزرگ است تمرکز بر روی جستجوی سراسری است و در حالی که  $a$  کوچک است تمرکز بر روی جستجوی محلی انجام می‌شود. در ادامه عملکرد این الگوریتم در مسئله مدیریت جریان ترافیک هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳- نتایج و بحث

آزمایش‌ها در محیطی با شرایط ذکر شده در جدول شماره (۲) انجام شده است.

جدول شماره (۲): مشخصات سیستم آزمایش

مشخصات	سخت افزار/ نرم افزار
دو هسته‌ای	پردازنده
4.0 GB	حافظه اصلی
320 GB	هارد دیسک
Microsoft Windows 7 Ultimate	سیستم عامل

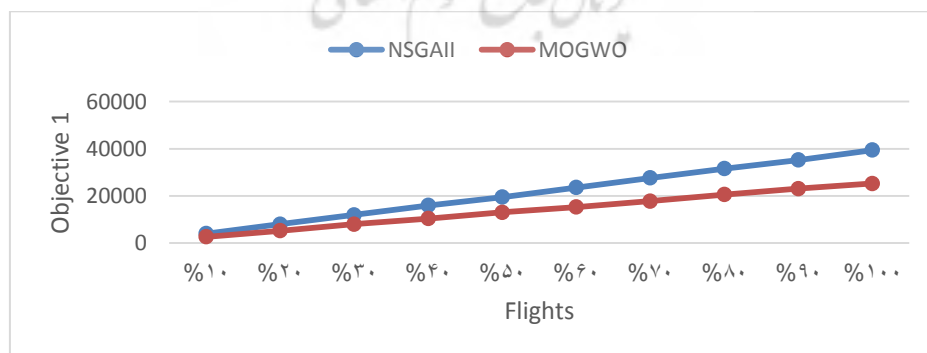
زبان برنامه‌نویسی  
Matlab R2016b

برای اجرای روش‌های مورد مقایسه نیاز است تا برخی پارامترهای اولیه تعیین شود. در جدول زیر پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی‌ها برای روش‌های چندهدفه ارائه شده است.

جدول شماره (۳): مقداردهی اولیه پارامترهای روش‌های مورد مقایسه

روش پارامتر	MOGWO	NSGAI
اندازه جمعیت	10	10
تعداد نسل	10	10
نرخ برش	-	۰/۴
نرخ جهش	-	۰/۰۴
نرخ نخبه کشی	-	۰/۳
تعداد بخش‌بندی گرید	۱۰	-
اندازه آرشیو	۲۰	-

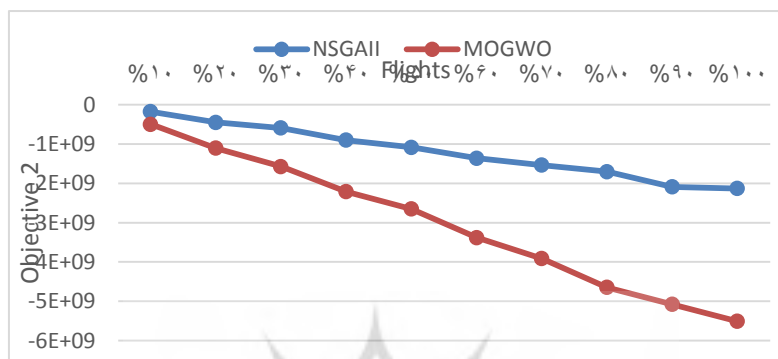
برای انجام آزمایش‌ها از مجموعه داده جمع‌آوری شده در پروازهای فرودگاه شهید هاشمی نژاد مشهد استفاده شده است. در واقع انجام آزمایش‌ها بر روی مجموعه داده‌های واقعی بوده است. این مجموعه داده که پروازهای بازه زمانی ۲۰۱۸/۵/۳ تا ۲۰۱۸/۷/۳ را شامل می‌شود، حاوی ویژگی‌هایی است که شامل تاریخ پرواز، شناسه هواپیما، مبدأ، مقصد، نوع هواپیما، ارتفاع پرواز، اندازه هواپیما، مسیر پرواز، ساعت فرود برنامه‌ریزی شده، سرعت پرواز و غیره است. این مجموعه داده در نهایت شامل ۴۳۶۸ پرواز است. در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مدل تحقیق در راستا دستیابی به اهداف می‌پردازیم. در ابتدا ارزیابی‌ها بر روی سه تابع هدف انجام شده است. برای انجام ارزیابی‌ها ابتدا ۱۰٪ داده‌ها در نظر گرفته شده است و به ازای این مقدار از داده‌ها هر دو روش NSGAI و MOGWO انجام شده است. پس از ثبت نتایج حاصل از ارزیابی هر روش، ۲۰٪ از مجموعه داده‌ها برای ارزیابی در نظر گرفته شده و این بار هر دو روش به ازای این مقدار از داده‌ها انجام شده است و نتایج ثبت شده است. این روند تا زمانی که ۱۰۰٪ مجموعه داده مورد ارزیابی قرار بگیرد ادامه یافته است. همان‌طور که پیش‌ازین بیان شد، در هر سه تابع هدف، هدف حداقل کردن است از این رو در نتایجی که در ادامه ارائه شده است رویکردی که منجر به ارائه مقادیر کمتری شده است، روند بهتری را طی کرده است. نتایج حاصل از اجرای روش‌های مورد مقایسه در مورد معیار هدف ۱ در شکل شماره (۲)، قابل مشاهده است.



شکل شماره (۲): مقایسه روش‌های NSGAI و MOGWO بر روی هدف ۱

نتایج ارائه شده در شکل شماره (۲)، در راستا بررسی هدف شماره ۱ است، نشان‌دهنده میزان اختلاف میان زمان فرود برنامه‌ریزی شده و زمان فرود پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. واضح است که انتظار می‌رود زمان فرود برنامه‌ریزی شده و فرود

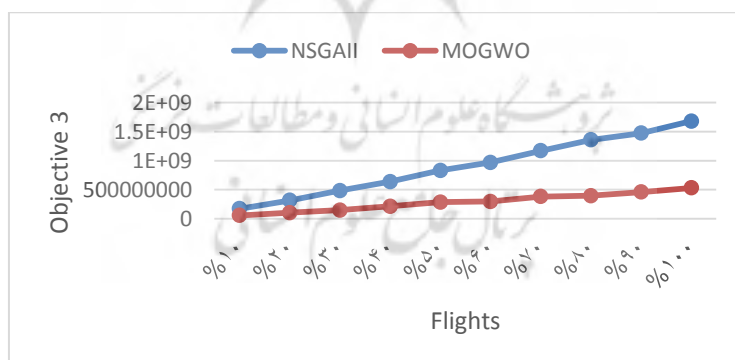
پیش‌بینی شده به یکدیگر نزدیک باشند و هر چه این اختلاف کمتر باشد روش پیشنهادی عملکرد بهتری ارائه داده است. نتایج شکل شماره (۲)، نشان از برتری روش پیشنهادی در تمامی بخش‌بندی انجام‌شده بر روی مجموعه داده را دارد، که با افزایش اندازه مجموعه داده، مجموع اختلاف نیز افزایش یافته که کاملاً طبیعی است. علاوه بر این با بزرگ شدن مجموعه داده اختلاف میان روش پیشنهادی و روش مورد مقایسه نیز بیشتر شده و عملکرد روش پیشنهادی به مراتب از روش مورد مقایسه بهتر بوده است. هدف شماره ۲ پس از محاسبات در شکل شماره (۳)، جهت مقایسه عملکرد روش پیشنهادی و روش NSGAI قابل مشاهده است.



شکل شماره (۳): مقایسه روش‌های NSGAI و MOGWO بر روی هدف ۲

همانند شکل شماره (۲) در شکل شماره (۳) نیز عملکرد روش پیشنهادی به مراتب نسبت به روش پایه بهتر است. به نحوی که در مجموعه داده با ۱۰٪ اندازه، روش MOGWO نسبت به روش NSGAI بهبود عملکرد دارد. علاوه بر این با افزایش اندازه مجموعه داده این برتری ادامه پیدا می‌کند به نحوی که در آزمایش‌ها صورت گرفته بر روی ۱۰۰٪ مجموعه داده، روش پیشنهادی نسبت به روش پایه برتری دارد.

در هدف شماره ۳، مقایسه عملکرد میان دو روش NSGAI و MOGWO مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج در شکل شماره (۴)، قابل مشاهده است.



شکل شماره (۴): مقایسه روش‌های NSGAI و MOGWO بر روی هدف ۳

همانند اهداف ۱ و ۲ در هدف ۳ نیز برتری روش پیشنهادی را می‌توان به ازای تمامی بازه‌های مورد ارزیابی مشاهده کرد. در این هدف نیز روش پیشنهادی بهتر از روش پایه عمل می‌کند که بیشترین اختلاف به ازای مجموعه داده با ۱۰۰٪ اندازه و کمترین اختلاف نیز برای مجموعه داده با ۱۰٪ است. برای انجام آزمایش‌ها از مجموعه داده جمع‌آوری شده در پروازهای فرودگاه شهید هاشمی نژاد مشهد استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی مجموعه داده‌های واقعی مربوط به پروازهای زمانی ۲۰۱۸/۵/۳ الی ۲۰۱۸/۷/۳ را شامل می‌شود. این مجموعه داده‌ها شامل تاریخ پرواز، شناسه هواپیما، مبدأ، مقصد، نوع هواپیما، ارتفاع پرواز، اندازه هواپیما، مسیر پرواز، ساعت فرود برنامه‌ریزی شده، سرعت پرواز و غیره است. اندازه‌ی این داده‌ها برابر با ۴۳۶۸ است. از این مجموعه داده‌ها، داده‌های شامل تاریخ پرواز، نوع هواپیما، سرعت هواپیما ساعت فرود برنامه‌ریزی شده مورد نیاز است که در مسئله زمان‌بندی فرود هواپیما استفاده می‌شود.

برای آماده‌سازی داده‌ها پیش از اعمال الگوریتم، داده‌ها ساعت پرواز و فرود در جدول زمانی از پیش تعیین شده است که این زمان به دقیقه تبدیل شد و سپس در هر حلقه از ارزیابی پروازها، پروازها از زمان شروع الی ۱۲۰ دقیقه بعد در یک دسته و دسته‌بندی پروازها تا اتمام زمان نهایی انجام می‌شود. در هر دسته شماره اندیس هر پرواز ذخیره می‌شود و هر حلقه شامل تعداد کل دسته‌ها برای هر دسته از پروازها که هر حلقه بهترین تابع هزینه یافته شده مربوط به هر دسته ذخیره شده و در نهایت مجموع این مقادیر به‌عنوان بهترین تابع هزینه نهایی محاسبه می‌شود و قیود آن شامل زمان زود رسیدن و زمان تأخیر مجاز نیز لحاظ شود. اگر این زمان‌ها برقرار نشود، جزو راه‌حل‌های مسئله قرار نمی‌گیرد. قید دیگر بررسی نوع هواپیما است که باید لحاظ شود. وابسته به نوع هواپیما باید فاصله‌ی زمانی میان فرود هواپیما بعدی با هواپیما‌ی فعلی در نظر گرفته می‌شود. اگر هواپیما از نوع سنگین یا متوسط باشد، باید وقت کافی برای فرود هواپیما بعدی برقرار باشد، اگر این زمان برقرار نباشد راه‌حل یافته شده به‌عنوان جواب در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین جواب‌هایی به دست می‌آیند که در قیود مسئله برقرار باشند. در نهایت تابع هزینه کلی برای تمام دسته‌ها به دست آمده و جواب نهایی توسط هر الگوریتم ذخیره می‌شود.

ارزیابی‌ها به کمک الگوریتم گرگ خاکستری بهبودیافته بر روی تابع هزینه (۱) انجام شد و برای انجام ارزیابی‌ها ابتدا ۱۰٪ داده‌ها در نظر گرفته شد و به ازای این مقدار از داده‌ها نتایج به روش‌های گرگ خاکستری بهبودیافته (IGWO)، گرگ خاکستری معمولی (GWO)، ازدحام ذرات (PSO) و روش کرم شب‌تاب (FA<sup>۱۷</sup>)، به دست آمد و پس از ثبت نتایج حاصل از ارزیابی هر روش، ۲۰٪ از مجموعه داده‌ها برای ارزیابی در نظر گرفته شده و این بار هر چهار روش به ازای این مقدار از داده‌ها بررسی شده و نتایج ثبت شده است. این روند تا زمانی که ۱۰۰٪ مجموعه داده مورد ارزیابی قرار بگیرد ادامه پیدا کرد که در جدول شماره (۴)، پارامترهای تنظیم شده مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌سازی قابل مشاهده است.

جدول شماره (۴): پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم	تعداد تکرار بیشینه	تعداد جمعیت	پارامترهای اختصاصی
کرم شب‌تاب	۱۰	۱۰	$\gamma=1, \beta_0=2, \alpha=0.2, \alpha_{damp}=0.99, \delta=1.5, m=2$
بهینه‌سازی توده ذرات	۱۰	۱۰	$w_{max}=0.9, w_{min}=0.3138, c_1=2, c_2=2$
گرگ خاکستری	۱۰	۱۰	$a_{max}=2, a_{min}=0$
گرگ خاکستری بهبودیافته	۱۰	۱۰	$a_{max}=1.5, a_{min}=0.5$

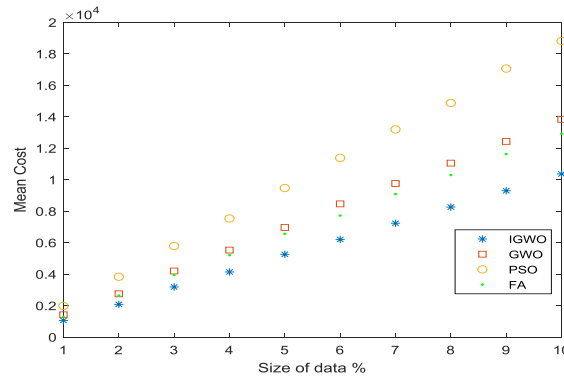
با توجه به پارامترهای تنظیم شده در جدول شماره (۴)، تمام الگوریتم‌ها ۲۰ بار اجرا شده و نتایج مربوط به میانگین، بهترین، بدترین و انحراف معیار تابع هزینه بررسی و ذخیره شد و نتایج مقایسه‌ای الگوریتم‌ها به ازای داده‌های مختلف در جدول شماره (۵) و شکل شماره (۴) نشان داده شده است.

الگوریتم	۱۰٪	۲۰٪	۳۰٪	۴۰٪	۵۰٪
IGWO	۱۰۰۲	۲۰۰۷	۳۱۳۷	۴۰۷۴	۴۹۷۹
میانگین	۱۰۶۱	۲۰۸۵	۳۱۸۸	۴۱۴۳	۵۱۴۱
بدترین	۱۰۸۵	۲۱۴۲	۳۲۶۰	۴۲۳۸	۵۲۵۵
انحراف معیار	۳۶/۴۷	۴۱/۲۴	۴۵/۱۶	۵۵/۸۴۱۶	۷۹/۴۱۱۷
GWO	۱۴۱۵	۲۷۰۶	۴۱۲۷	۵۲۵۹	۶۸۷۳
میانگین	۱۴۲۲	۲۷۵۴	۴۲۰۳	۵۵۳۱	۶۹۶۸
بدترین	۱۴۵۱	۲۸۰۷	۴۳۰۰	۵۷۳۳	۷۰۸۴
انحراف معیار	۴۶/۴۸	۵۷/۴۷	۶۸/۸۴	۱۹۷/۹۱	۱۰۱/۴۶
PSO	۱۸۷۳	۳۷۴۸	۵۸۰۲	۷۳۸۲	۹۳۲۰

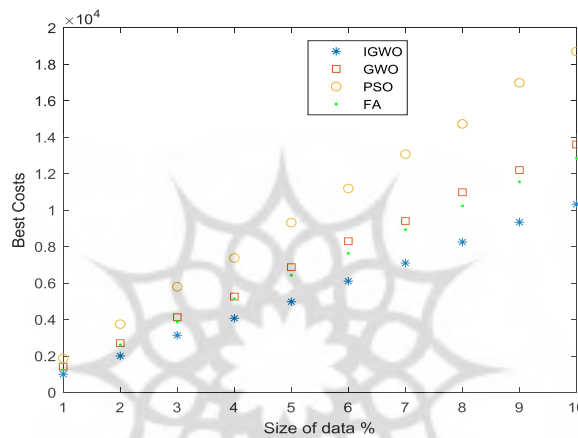
<sup>17</sup> Firefly algorithm

۹۴۷۶	۷۵۴۰	۵۷۹۱	۳۸۳۹	۱۹۸۵	میانگین	
۹۶۹۰	۷۶۷۲	۵۸۹۲	۳۹۳۱	۲۱۰۱	بدترین	
۱۶۲/۳۶	۱۰۸/۸۳	۱۳۹/۹۳۵	۶۹/۱۸	۹۱/۰۶۲	انحراف معیار	
۶۴۳۴	۵۱۴۶	۳۸۸۷	۲۶۱۴	۱۲۳۳	بهترین	FA
۶۵۶۲	۵۲۱۲	۳۹۴۸	۲۶۴۵	۱۲۸۷	میانگین	
۶۶۷۹	۵۳۱۲	۳۹۹۴	۲۶۸۱	۱۳۱۳	بدترین	
۹۶/۶۵	۷۳/۵۴	۴۸/۹۲۶	۴۳/۱۳	۳۷/۰۱۶	انحراف معیار	
						الگوریتم
% ۱۰۰	% ۹۰	% ۸۰	% ۷۰	% ۶۰		IGWO
۱۰۳۲۵	۹۳۴۲	۸۲۵۵	۷۱۰۳	۶۱۰۷	بهترین	
۱۰۳۷۲	۹۳۹۰	۸۲۶۵	۷۲۴۰	۶۲۱۱	میانگین	
۱۰۴۱۲	۹۴۹۰	۸۳۰۱	۷۴۰۱	۶۳۴۵	بدترین	
۳۶/۴۶	۵۰/۴۲	۴۲/۰۵۱	۸۹/۸۶	۱۱۲/۰۵	انحراف معیار	
۱۳۶۰۶	۱۲۲۰۴	۱۰۹۸۶	۹۴۰۷	۸۲۹۷	بهترین	GWO
۱۳۸۴۳	۱۲۴۳۷	۱۱۰۵۸	۹۷۰۷	۸۴۷۰	میانگین	
۱۳۹۶۴	۱۲۶۶۱	۱۱۱۷۰	۹۹۰۲	۸۶۱۷	بدترین	
۱۴۵/۲۱	۱۸۸/۸۱	۷۵/۰۰۱۳	۱۳۳/۱۵	۱۳۲/۲۳	انحراف معیار	
۱۸۷۰۸	۱۶۹۸۶	۱۴۷۳۷	۱۳۰۷۵	۱۱۱۹۱	بهترین	PSO
۱۸۸۲۴	۱۷۰۶۸	۱۴۸۸۱	۱۳۲۰۳	۱۱۳۶۶	میانگین	
۱۹۰۳۱	۱۷۲۵۱	۱۵۰۷۸	۱۳۴۴۴	۱۱۴۲۹	بدترین	
۲۰۴/۷۶	۱۰۶/۹۸	۱۳۲/۴۶	۱۵۹/۹۸	۱۱۴/۹۶	انحراف معیار	
۱۲۸۴۹	۱۱۵۵۵	۱۰۲۳۸	۸۹۳۵	۷۶۳۳	بهترین	FA
۱۲۹۲۴	۱۱۶۳۶	۱۰۳۰۰	۹۰۹۳	۷۷۲۵	میانگین	
۱۳۰۸۲	۱۱۶۷۴	۱۰۳۳۵	۹۱۴۶	۷۸۴۹	بدترین	
۹۳/۸۴	۷۴/۷۴	۸۸/۴۸	۹۸/۲۱	۱۲۷/۱۰	انحراف معیار	

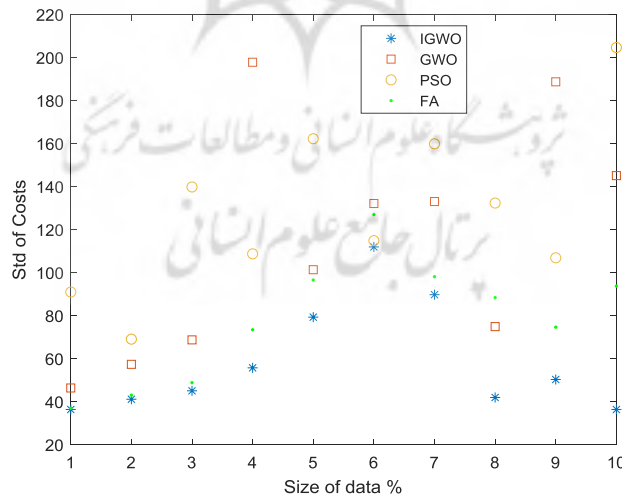
اعداد مربوط در جدول شماره (۵)، نشان دهنده اختلاف زمان میان زمان برنامه ریزی شده توسط الگوریتم های فرا ابتکاری مختلف با زمان پیش بینی شده می باشند. با توجه به جدول ۵ مشاهده می شود الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری بهبود یافته (IGWO) در بهترین، میانگین، بدترین و انحراف معیار تابع هزینه در ۲۰ بار اجرای برنامه، در مجموع نسبت به سایر الگوریتم ها به نتایج بهتری دست یافته است. به عنوان مثال در حالت ۱۰ درصد داده ها، بهترین مقدار تابع هزینه به دست آمده از الگوریتم IGWO، مقدار ۱۰۰۲ است که در مقایسه با الگوریتم های GWO که مقدار عددی ۱۴۱۵، PSO با مقدار عددی ۱۸۷۳ و FA با مقدار عددی ۱۲۳۳ نتیجه ی بهتری به دست آورده است. همچنین در حالت ۱۰۰ درصد داده ها الگوریتم پیشنهادی IGWO از نظر میانگین بهترین تابع هزینه در ۲۰ بار اجرا، مقدار عددی ۱۰۳۷۲ را به خود اختصاص داده که در مقایسه با الگوریتم های GWO که این مقدار عددی برابر با ۱۳۸۴۳، در الگوریتم PSO برابر با ۱۸۸۲۴ و در الگوریتم FA برابر با ۱۲۹۲۴ مقدار کمتری به دست آورده است. در مجموع مشاهده می شود که تمام اعداد مربوط به مقدار تابع هزینه به دست آمده از الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته در مقایسه با سایر الگوریتم ها کوچک تر است. بنابراین کارایی و عملکرد بالای این الگوریتم در حل مسئله ی زمان بندی پرواز به نتیجه رسیده است. در شکل ۴ منحنی مقایسه ای مربوط به میانگین تابع هزینه به دست آمده از الگوریتم ها برای ۱۰۰ درصد داده ها نشان داده شده است. در شکل ۵ منحنی بهترین اجرا در میان ۲۰ بار اجرا برای هر الگوریتم نشان داده شد و در شکل شماره (۶)، منحنی انحراف معیار مربوط به ۲۰ اجرا مشاهده می شود.



شکل شماره(۵): منحنی میانگین تابع هزینه بر حسب اندازه داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های IGWO,GWO,PSO,FA



شکل شماره(۶): منحنی بهترین اجرای تابع هزینه بر حسب اندازه داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های IGWO,GWO,PSO,FA



شکل شماره(۷): منحنی انحراف معیار اجرای تابع هزینه بر حسب اندازه داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های IGWO , GWO, PSO, FA

نتایج مشاهده شده در شکل شماره(۷)، نشان می‌دهد که نقاط مربوط به میانگین بهترین هزینه یافته شده بر حسب اندازه داده‌ها مشاهده می‌شود که به‌عنوان مثال نقطه‌ی [3 0.6] دایره‌ای شکل در این منحنی مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی PSO است که از جدول شماره(۱)، مقدار ۵۷۹۱ برای این الگوریتم به دست آمده است. نقاط ستاره مربوط به الگوریتم IGWO است. نقاط نقطه-ای، مربعی و دایره‌ای به ترتیب مربوط به الگوریتم‌های FA، GWO و بهینه‌سازی PSO است.

از شکل شماره(۵)، که منحنی مربوط به بهترین اجرا برای هر الگوریتم است، مشاهده می‌شود که بهترین نتیجه را الگوریتم پیشنهادی IGWO به دست آورده است. به ازای تمام اندازه‌های مختلف داده‌ها، الگوریتم پیشنهادی توانسته است مقادیر

کمتری در مقایسه با نقاط نقطه‌ای، مربعی و دایره‌ای به دست آورد. از شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود که کمترین انحراف معیار به دست آمده مربوط به الگوریتم پیشنهادی IGWO است. فقط در ۱۰ درصد داده‌ها نتیجه آن با الگوریتم کرم شب‌تاب تقریباً مشابه شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که در مجموع الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری بهبودیافته (IGWO) از نظر میانگین تابع هزینه بهتر عمل نموده است. در میان الگوریتم‌های دیگر، عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) بهتر از دو الگوریتم دیگر شده است، اما سرعت اجرای این الگوریتم کم است. در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده، نتیجه می‌شود که الگوریتم گرگ خاکستری بهبودیافته پیشنهادی، عملکرد بهتری از نظر کمینه‌سازی تابع هزینه در تمام حالات مربوط به اندازه داده‌های مختلف در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها داشته است.

به منظور حل مسئله زمان‌بندی فرود هواپیماها (ALP)، داده‌های مربوط به مجموعه داده‌های واقعی فرودگاه شهید هاشمی نژاد مشهد با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری بهبودیافته مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری بهبودیافته طوری طراحی شد که بتواند پروازها را به نحوی زمان‌بندی کند که به هدف کمینه‌سازی اختلاف میان زمان پیش‌بینی شده و زمان برنامه‌ریزی شده با در نظر گرفتن شرایط مسئله دست یابد. به منظور افزایش کارایی الگوریتم یک عملگر جهش و یک جستجوی تصادفی حول بهترین گرگ انجام شد و به منظور بهبود این الگوریتم بر اساس مقدار برازندگی به دست آمده به ازای هر گرگ آلفا، بتا و دلتا، یک وزن به آن‌ها اختصاص داده شد که موقعیت جدید بر اساس این وزن دهی محاسبه شد. شبیه‌سازی‌ها بر روی ده درصد الی ۱۰۰ درصد داده‌ها انجام شد. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده از آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، گرگ خاکستری معمولی و کرم شب‌تاب مقایسه شد که الگوریتم پیشنهادی عملکرد و کارایی قابل توجهی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مشابه خود داشته است.

بر اساس نتایج مقاله حاضر در راستا کاهش شکاف علمی پیشنهادی ارائه می‌شود، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی در کاربردهای مشابه با مسئله زمان‌بندی هواپیما استفاده کرد. به نظر می‌رسد با توجه به ماهیت NP-hard مسئله زمان‌بندی پروازها (ALP)، رویکردهای فرا ابتکاری مبتنی بر هوش ازدحامی یکی از بهترین راه‌های رسیدن به جواب بهینه باشند. در این میان روش پیشنهادی در این پژوهش نیز نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری چنانچه به خوبی تنظیم شده باشند نتایج درخور توجهی ارائه می‌دهند. از این رو به محققین علاقه‌مند به این زمینه پیشنهاد می‌شود که با در نظر گرفتن الگوریتم‌های دیگری در زمینه‌ی هوش ازدحامی از جمله الگوریتم‌های ازدحام ذرات، خفاش، کرم شب‌تاب به حل مسئله زمان‌بندی فرود هواپیماها در فرودگاه‌های دیگر با شرایط و قیدهای دیگری پرداخته شود.

#### ۴- منابع

1. Bencheikh, G., Boukachour, J., & Alaoui, A. E. H. (2016). A memetic algorithm to solve the dynamic multiple runway aircraft landing problem. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 28(1), 98-109.
2. Bennell, J. A., Mesgarpour, M., & Potts, C. N. (2017). Dynamic scheduling of aircraft landings. *European Journal of Operational Research*, 258(1), 315-327.
3. Carrì, S., & aaaccll, M. (2004). Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model. *Journal of Air Transport Management*, 10(5), 345-351.
4. Deng, Q., Santos, B. F., & Curran, R. (2020). A practical dynamic programming based methodology for aircraft maintenance check scheduling optimization. *European Journal of Operational Research*, 281(2), 256-273.
5. Deng, Q., Santos, B. F., & Curran, R. (2020). A practical dynamic programming based methodology for aircraft maintenance check scheduling optimization. *European Journal of Operational Research*, 281(2), 256-273.
6. Ikli, S., Mancel, C., Mongeau, M., Olive, X., & Rachelson, E. (2020, June). Coupling Mathematical Optimization and Machine Learning for the Aircraft Landing Problem. In *ICRAT 2020, 9th International Conference for Research in Air Transportation*.



7. Li, L., Sun, L., Guo, J., Qi, J., Xu, B., & Li, S. (2017). Modified discrete grey wolf optimizer algorithm for multilevel image thresholding. *Computational intelligence and neuroscience*, 2017.
8. Liu, M., Liang, B., Zheng, F., Chu, C., & Chu, F. (2018, July). A two-stage stochastic programming approach for aircraft landing problem. In *2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)* (pp. 1-6). IEEE.
9. Mahmud, A. A., & Jebersen, W. (2017). Review on Dynamic Aircraft Scheduling. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117(21), 753-767.
10. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
11. Mokhtarimousavi, S., Rahami, H., & Kaveh, A. (2015). Multi-objective mathematical modeling of aircraft landing problem on a runway in static mode, scheduling and sequence determination using NSGA-II. *Iran University of Science & Technology*, 5(1), 21-36.
12. Mokhtarimousavi, S., Rahami, H., Saffarzadeh, M., & Piri, S. (2014). Determination of the aircraft landing sequence by two meta-heuristic algorithms. *International Journal of Transportation Engineering*, 1(4), 271-284.
13. Mokhtarimousavi, S., Talebi, D., & Asgari, H. (2018). A non-dominated sorting genetic algorithm approach for optimization of multi-objective airport gate assignment problem. *Transportation Research Record*, 2672(23), 59-70.
14. Ng, K. K. H., Lee, C. K. M., Chan, F. T., & Qin, Y. (2017). Robust aircraft sequencing and scheduling problem with arrival/departure delay using the min-max regret approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 106, 115-136.
15. Prakash, R., Piplani, R., & Desai, J. (2018). An optimal data-splitting algorithm for aircraft scheduling on a single runway to maximize throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 570-581.
16. Ren, Y., Lu, Z., & Liu, X. (2020). A branch-and-bound embedded genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem with resource transfer time of aircraft moving assembly line. *Optimization Letters*, 1-35.
17. Ruan, J. H., Wang, Z. X., Chan, F. T., Patnaik, S., & Tiwari, M. K. (2021). A reinforcement learning-based algorithm for the aircraft maintenance routing problem. *Expert Systems with Applications*, 169, 114399.
18. Salehipour, A., Modarres, M., & Naeni, L. M. (2013). An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem. *Computers & Operations Research*, 40(1), 207-213.
19. Shahmoradi-Moghadam, H., Safaei, N., & Sadjadi, S. J. (2021). Robust Maintenance Scheduling of Aircraft Fleet: A Hybrid Simulation-Optimization Approach. *IEEE Access*, 9, 17854-17865.
20. Sylejmani, K., Bytyçi, E., & Dika, A. (2017). Solving aircraft sequencing problem by using genetic algorithms. *Intelligent Decision Technologies*, 11(4), 451-463.
21. Vadlamani, S., & Hosseini, S. (2014). A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway. *Journal of Air Transport Management*, 40, 144-148.
22. Wei, M., Sun, B., Wu, W., & Jing, B. (2020). A multiple objective optimization model for aircraft arrival and departure scheduling on multiple runways. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(5), 5545-5560.
23. Wei, M., Zhao, L., Ye, Z., & Jing, B. (2020). An integrated optimization mode for multi-type aircraft flight scheduling and routing problem [J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(5), 4990-5004.

24. Xu, B. (2017). An efficient Ant Colony algorithm based on wake-vortex modeling method for aircraft scheduling problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 317, 157-170.
25. Yu, S. P., Cao, X. B., & Zhang, J. (2011). A real-time schedule method for Aircraft Landing Scheduling problem based on Cellular Automation. *Applied Soft Computing*, 11(4), 3485-3493.
26. ZHANG, J., ZHAO, P., YANG, C., & HU, R. (2020). A New Meta- Heuristic Approach for Aircraft Landing Problem. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. (37) 2, 197-208.
27. Zhang, J., Zhao, P., Zhang, Y., Dai, X., & Sui, D. (2020). Criteria selection and multi-objective optimization of aircraft landing problem. *Journal of Air Transport Management*, 82, 101734.
28. Zheng, S., Yang, Z., He, Z., Wang, N., Chu, C., & Yu, H. (2020). Hybrid simulated annealing and reduced variable neighbourhood search for an aircraft scheduling and parking problem. *International Journal of Production Research*, 58(9), 2626-2646.
29. Zulkifli, A., Aziz, N. A. A., Aziz, N. H. A., Ibrahim, Z., & Mokhtar, N. (2018). Review on computational techniques in solving aircraft landing problem. 128-131



## **Air traffic flow management of incoming flights Using MOGWO and NSGAIL approach (Case study: Mashhad International Airport)**

**Manezhe Teimoori**

Ph.D. candidate, department of management, Tabriz branch, Islamic Azad University

**Houshang Taghi Zadeh** (Corresponding Author)

Associate Professor, Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**Jafar Pourmahmoud**

Shahid Madani University of Azerbaijan, Department of Applied Mathematics, Tabriz, Iran

**Morteza Honarmand Azimi**

Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

### **Abstract**

Air traffic management is one of the most sensitive and stressful jobs that face various problems and obstacles every day, and the issue of aircraft sequencing is one of the most important issues addressed in the field of flight surveillance work these days. Sooner or later than the specified time, there is a cost per flight, and existing techniques do not measure time factors, so the cost of delay penalties is very high, while there are many techniques to reduce this. There is a penalty. For this purpose, in this article, the issue of aircraft landing is investigated and then, with the help of an optimization function, a model is provided to increase efficiency. In general, the problem of sequencing tasks is to determine the order in which they are performed on machines in order to decrease (or increase) the desired criterion. In the problem of optimization, determining the order of entry operations is considered both in regulations and in scholarly journals. In the early stages of air traffic sequencing, feature-based inbound management and navigation are used to expand design horizons, enabling traffic surveillance in both take-off and landing modes. Therefore, this article focuses on the landing sequence of aircraft and does this by examining parameters such as reducing apron and parking costs, minimizing latency and early arrival times, as well as minimizing fuel consumption costs. Finally, this paper aims to obtain a new way to improve the quality of scheduling programs and reduce its execution time by using approved theoretical algorithms and adapting them to the existing challenges in the field of scheduling. In this regard, experiments were performed on the data set of Mashhad Shahid Hasheminejad International Airport and the results showed that the main objectives of the aircraft landing schedule can be better achieved using this method.

**Keywords:** Air Traffic, Flow Management, MOGWO, NSGAIL.