نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم وصنعت ایران
ویژه‌نامه مهندسی عمران، جلد ۱۹، شماره ۸-۲، سال ۱۳۸۷، صفحه ۳۸-۲۹

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR PASSENGER FLIGHT PLANNING

Shahriar Afandizadeh ***Seyed Mahmoud Fazeli***

Department of Civil Eng. Iran University of Science & Technology

Abstract*: The problem of Airline planning has to tally been divided in to four sub-problems i.e.: flight scheduling, fleet assignment, aircraft routing and maintenance and crew scheduling In this paper for the first time a "Mathematical Integrated Model" for Airline planning, considering all sub- problems continuously, is build up and presented. But because the developed model is a kind of large scale, solving it trough routine "Operation Research" methods seemed to be impossible; so that methods called "Meta-Heuristic" is used, such as "Generic Algorithm". The presented model is solved for an Iranian International Airline using the generic algorithm method. The model s output, added to arrival and departure times for each origin- destination, it also determines kind of fleet assigned, aircraft assigned in each fleet to respective flight and related flight crews.*

مدل ریاضی برنامه‌ریزی پرواز هواپیماهای مسافربری

شهریار افندی‌زاده و سید محمود فاضلی

چکیده: مسأله برنامه‌ریزی پرواز شرکتهای هوایی، به طور کلی شامل چهار مسأله "زمان‌بندی پرواز"، "تخصیص ناوگان"، "مسیریابی و تعمیر و نگهداری هواپیما" و "زمان‌بندی و تخصیص خدمه پروازی" می‌باشد. در این پژوهش برای نخستین بار مدل ریاضی برنامه‌ریزی پرواز با ادغام چهار زیرمسأله اخیر به طور پیوسته، ساخته و در این مقاله ارائه شده است. اما با توجه به بزرگی مقیاس مدل توسعه یافته، حل آن با بکارگیری روشهای متداول تحقیق در عملیات امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا درحل این مسأله از روش ابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مدل ارائه شده برای داده های واقعی یک شرکت هواپیمایی داخلی به کمک الگوریتم ژنتیک حل شده‌است. خروجی این مدل علاوه بر زمانهای ورود و خروج پرواز، برای هر مبدأ- مقصد، نوع ناوگان تخصیص یافته، هواپیمای تخصیص یافته در هر ناوگان به پرواز مربوطه و خدمه پروازی مربوط به پرواز را تعیین می‌نماید.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی پرواز، زمان‌بندی پرواز، تخصیص ناوگان، مسیریابی و تعمیر و نگهداری هواپیما، زمان‌بندی خدمه

تاریخ وصول: ۸۵/۱۲/۱۴
تاریخ تصویب:۸۷/۱۱/۱۹

شهریارافندی‌زاده، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،: zargari@iust.ac.ir
سیدمحمود فاضلی، کارشناس ارشد مهندسی برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، smfazeli@CivilEng.iust.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

با تصویب قانون آزادسازی در سال ۱۹۷۸راه برای ایجاد تغییرات اساسی در صنعت هوایی هموار شد. به‌گونه‌ای که شرکت‌های هواپیمایی قادر بودند مسیر پروازی و نرخ بلیط‌های هر مسیر را خود تعیین کنند. این امر موجب ایجاد فضای رقابتی بین شرکت‌های هواپیمایی گردید. لذا شرکت‌های هواپیمایی برای بقاء و تثبیت جایگاه خود در بازار رقابتی به‌وجود آمده ناگزیر به استفاده از ابزارهای قدرتمندی جهت اتخاذ تصمیم‌های دقیق،کاهش هزینه و افزایش سهم خود از تقاضای موجود بودند. این ابزار استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی سیستماتیک و مبتنی بر منطق ریاضی در بخش‌های مختلف شرکت هواپیمایی بود. برنامه‌ریزی پرواز بخش عمده‌ای از فعالیت‌های یک شرکت هوایی را در بر می‌گیرد. از آن جهت که باید عوامل گوناگونی در تدوین یک برنامه پرواز لحاظ شود و اصولاً عملیات پرواز باید از ایمنی و اطمینان‌پذیری بالایی برخوردار باشد، تهیه یک برنامه پرواز یا زیر برنامه‌های آن معمولاً از یک فرآیند رفت و برگشتی تشکیل می‌شود. همچنین این فرآیند رفت و برگشتی تا رسیدن به یک برنامه پرواز عملیاتی بسیار زمان‌بر بوده و معمولاً در یک بازه زمانی شش ماهه انجام می‌شود. در یک برنامه پرواز جامع، به‌علت بزرگی ابعاد مسأله بهینه‌سازی، به واسطه انواع محدودیتها، انواع توابع هدف برای بهینه شدن،پارامترها و نیز انواع متغیرهای تصمیم‌گیری، فرایند مدل‌سازی و حل آن پیچیده و دشوار می‌باشد. بدین دلیل محققین، مسأله را به چند مسأله کوچک‌تر و مستقل تقسیم‌کرده و آنگاه به بررسی و حل هر یک می‌پردازند.

عناوین اصلی مسائلی که در برنامه‌ریزی پرواز مطرح می‌شود به‌شرح زیر می‌باشند:

۱- طراحی زمان‌بندی
۲- تخصیص ناوگان به پرواز
۳- تعیین مسیر پرواز و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری هواپیما (تخصیص هواپیما به پرواز)
۴- برنامه‌ریزی خدمه پرواز

اما حل هر یک از مسائل جزئی‌تر نیاز به ایجاد شرایط بهینه در هر یک از زیر مسأله‌ها دارد. در صورتی که این جواب بهینه در هر زیر مسأله بصورت گسسته منتج شده باشد و مسأله اصلی زمان‌بندی پرواز که در برگیرنده تمامی زیر مسائل جزئی‌تر می‌شود لزوماً در حالت بهینه نخواهد بود.

علاوه بر این مسأله، در چنین حالتی برای اینکه برنامه پرواز در حالت نسبتا بهینه‌ای قرار گیرد، باز هم فرآیند رفت و برگشتی میان هریک از زیرمسأله‌ها با یکدیگر و بخصوص با مرحله اول یعنی زمان‌بندی به‌وجود می‌آید که این امر موجب اتلاف وقت زیادی خواهد شد. لذا اتخاذ رویکردی متفاوت که تمامی زیر مسأله‌ها را به طور پیوسته درنظرگیرد، قادر خواهد بود جواب بهینه‌تری برای مسأله برنامه‌ریزی پرواز در اختیار قرار داده و همچنین کاهش قابل توجه در بازه زمانی فرآیند برنامه‌ریزی ایجاد کند. لذا لزوم اتخاذ چنین رویکردی کاملا ضروری می‌باشد.

در این مقاله برای نخستین‌بار مدل ریاضی یکپارچه برای مسأله برنامه‌ریزی بهینه پرواز هواپیماهای مسافربری طراحی و برای یک مسأله واقعی پیاده‌سازی و حل خواهد شد. مدل ساخته شده تمامی زیرمسأله‌ها را به‌صورت پیوسته در بر خواهد داشت و تمامی آنها را در تنها یک فرآیند حل بدون نیاز به رفت و برگشت بهینه خواهد نمود. فرضیات مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: مشخص بودن تقاضای سفر، مشخص بودن تعداد و نوع هواپیماها و مشخص بودن معیارهای ارزیابی زمان‌بندی.

۱-۱. روش تحقیق

در مقاله حاضر ابتدا به مرور ادبیات موضوع مسأله برنامه‌ریزی پرواز و جزئیات آن پرداخته می‌شود. سپس به هر یک از سه مرحله اصلی در فرآیند برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پرواز شرکت‌های هواپیمایی اشاره خواهد شد و با توسعه و تلفیق مدل ریاضی هریک از زیر مسأله‌های تشکیل‌دهنده برنامه‌ریزی پرواز، مدل جامع و یکپارچه آن به‌عنوان اولین دستاورد این مقاله ارائه می‌شود. در ادامه با درنظرگرفتن ابعاد بزرگ مدل و عدم امکان حل آن به کمک روش‌های و الگوریتم‌های قطعی، مدل طراحی شده با کمک روش‌های فراابتکاری و در بین آنها با توجه به قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک، به کمک آن و براساس داده‌های واقعی یک شرکت هوایی داخلی پیاده‌سازی شده و حل می‌شود.

در انتها یک برنامه‌پرواز کامل که در برگیرنده تمامی جزئیات عملیاتی پرواز که شامل زمان‌بندی پروازها و مبدا و مقصد آنها، نوع ناوگان متناظر با پرواز، هواپیمای موردنظر در ناوگان برای پرواز و گروه خدمه متناظر برای پرواز می‌باشد،به‌عنوان دستاورد نهایی مقاله ارائه می‌گردد.

۱-۲. طراحی زمان‌بندی

زمان‌بندی پرواز نقطه شروعی برای سایر مراحل برنامه‌ریزی و عملیات خطوط هوایی است [۱]. زمان‌بندی پرواز عبارت است از یک جدول زمانی که در برگرنده اسامی مسیرهایی که پرواز به آنها صورت می‌گیرد به همراه زمان دقیق انجام پروازمی‌باشد، تصمیم شرکت هوایی مبنی بر پیشنهاد پروازهای قطعی به شدت به عواملی همچون، پیش بینی تقاضای بازار، مشخصه‌های عملیاتی هواپیماهای در دسترس، نیروی انسانی موجود، دستورالعمل‌ها و تنظیمات و رفتار رقابتی خطوط هوایی بستگی دارد. تعداد فرودگاهها و تواتر پروازهای بکار گرفته شده توسط یک خط هوایی معمولاً اندازه فیزیکی شبکه هوایی را بیان می‌کند. [۲]

Archive of SID

www.SID.ir

۱-۳. تخصیص ناوگان

به‌طور کلی مدلهای تخصیص ناوگان، تعداد و انواع هواپیماهای موجود و همچنین یک برنامه زمان‌بندی مفروض با زمانهای ثابت برای خروج هواپیما را به عنوان ورودی گرفته و استفاده می‌کنند.

هزینه تخصیص یک هواپیمای نوع k به کمان پروازی i عبارت است از مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم. هزینه‌های مستقیم شامل تمامی هزینه‌های عملیاتی کمان پروازی i با هواپیمای نوع k می‌باشد در حالی که هزینه غیرمستقیم مسائل مرتبط با هزینه از دست رفتن[1] مسافران را در برمی‌گیرد.

تابع هدف در مسأله تخصیص ناوگان حداقل کردن هزینه تخصیص هواپیماهای در دسترس در انواع ناوگان موجود به کمانهای پروازی به‌گونه‌ای است که: هر کمان پروازی دقیقاً به یک نوع هواپیما تخصیص یابد، به‌گونه‌ای که تعداد پروازهای تخصیص یافته به یک نوع هواپیما که وارد یک منطقه می‌شوند و از آن خارج می‌شوند با یکدیگر در تعادل باشند (شرایط تعادل) و تعداد هواپیماهای هر نوع از ناوگانهای تخصیص یافته به شبکه، متجاوز از تعداد هواپیماهای موجود و در دسترس نباشد.

نخستین بار فرگوسن[2] و دانتزینگ[3] [۳] در سال ۱۹۵۴ مسأله تخصیص ناوگان را با به‌کارگیری برنامه‌ریزی خطی فرموله‌کردند. پانایتپولس[4] و داسکین[5] [۴] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح معرفی کردند که هواپیما را به مسیرها تخصیص می‌داد. آبارا[6] [۵] مدلی را معرفی نمود که در آن از کمانهای اتصال به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شد که می‌تواند منجر به تحولی در کاهش تعداد متغیرهای موجود شود. هین[7] [۶] مدل آبارا را به کمک شبکه‌های زمان-مکان توسعه داد رکسینگ[8] [۷] یک مدل بسط یافته تخصیص ناوگان را معرفی کرد که اجازه زمان‌بندی مجدد پرواز را به صورت جزئی و در یک چارچوب زمانی کوچک می‌داد.

۱-۴. مسیریابی هواپیما

تعمیر و نگهداری و مسیریابی هواپیما، چرخش‌های واقعی هواپیما و یا توالی پروازهای اتصالی آغازی و پایانی یک هواپیمای مشخص در مکانهای مشابه می‌باشد. این مسأله با توجه به قوانین تعمیر و نگهداری که توسط سازمانهای ذیربط و شرکتهای هوایی وضع می‌شود، تعیین گردیده و خط هوایی را به سوی آن رهنمون می‌شود. طبق این قوانین هر هواپیما بازای تعداد ساعات مشخصی پرواز باید تحت عملیات بازدید، تعمیر و نگهداری قرار گیرد.زمانی که موعد عملیات تعمیر و نگهداری هواپیما فرا می‌رسد،هواپیما از سرویس خارج شده و اصطلاحا زمین‌گیر می‌شود و به‌طورکلی مجاز به پرواز نمی باشد.در صورت عدم رعایت قوانین تعمیر و نگهداری شرکت هوایی متحمل جریمه سنگینی خواهد شد.

سیمپسون[9] [۸] چندین مدل مرتبط با مسأله مسیریابی هواپیما را مورد بررسی قرار داد. مطالعات دیگری نیز در زمینه مدلهای مسیریابی و تعمیر و نگهداری هواپیما انجام شده است [۹،۱۰ و۱۱].

۱-۵. زمان‌بندی خدمه پرواز

در مسأله زمان‌بندی خدمه، تابع هدف یافتن حداقل هزینه تخصیص خدمه پروازی به ساعت‌های پروازی با توجه به چند محدودیت مرتبط می‌باشد. از جمله این قیود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱-هر یک از ناوگان‌های موجود، خلبان‌های منحصر به خود دارد که متخصص پرواز با آن نوع از ناوگان هستند. به عبارت دیگر هر خلبان تنها واجد شرایط پرواز با یک نوع از ناوگانهای موجود می‌باشد.

۲-برنامه زمان‌بندی کاری، باید محدودیتهای حداکثر زمان دور از پایگاه خدمه (بازه زمانی که خدمه‌های پرواز دور از ایستگاه محل اقامتگاه خود بسر می‌برند) را ارضا کند.

۳-خدمه پروازی مجاز به پرواز یا ماندن در حالت وظیفه بیش از زمان مجاز تعیین شده نمی‌باشند.

۴-برنامه زمان‌بندی کاری باید حداقل زمان استراحت برای خدمه را تضمین کند.

مسأله زمان‌بندی خدمه پرواز معمولاً به دو گام یا دو فاز جداگانه به ترتیب زیر تقسیم می‌شود:

۱- مسأله جفت و جور کردن خدمه

۲- مسأله تخصیص خدمه

هدف در مسأله جفت و جور کردن خدمه، یافتن یکسری از زمان‌بندی‌های کاری است، که هر پرواز را با تعداد زمانهای مقتضی پوشش داده و هزینه‌های کلی را کمینه می‌سازد، در مسأله تخصیص خدمه،هریک از جفت و جورها با زمانهای استراحت، تعطیلات و تمرین خدمه ترکیب می‌شود تا زمان‌بندی‌های کاری تمدیدشده‌ای که می‌تواند به طور اختصاصی و ویژه اجرا شوند، ایجاد گردد. هدف مسأله تخصیص خدمه حداقل کردن هزینه کارمندان درگیر با یک برنامه زمان‌بندی کاری می‌باشد.

ونس[10] [۱۲] به معرفی مدل ریاضی مسأله بهینه سازی جفت و جور کردن خدمه با متغیرهای تصمیم‌گیری بر اساس بازه‌های وظیفه نسبت به جفت و جورها پرداختند. فرمول‌بندی آنها قادر بود مقدار

---

[1] *Spill Cost*
[2] *Ferguson*
[2] *Vance*
[3] *Dantzing*
[4] *Panayiotopoulos*
[5] *Daskin*
[6] *Abara*
[7] *Hane*
[8] *Rexing*
[9] *Simpson*
[10] *Vance*

Archive of SID

www.SID.ir

بهینه حد پایینی آزادی قیود در برنامه‌ریزی خطی را بهبود بخشد. با این وجود فرمول بندی آنها دشوارتر از فرمول بندی سنتی مسأله جفت و جور کردن خدمه برای حل کردن بود.

پس از تشریح هریک از زیر مسأله‌های موجود در برنامه‌ریزی پرواز ،در قسمت بعدی به معرفی مدل ریاضی ارائه شده و تشریح هریک از متغیرها، پارامترها، توابع هدف و قیود آن پرداخته می‌شود.

۲. تشریح مدل ریاضی

پیش از آنکه به توضیح قیود مدل پرداخته شود متغیرها و پارامترهای به کار رفته در مدل معرفی می‌گردند:

خدمه c پس از پرواز کمان j در ایستگاه است.

$$CS_{c.j}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

f: اندیس نشاندهنده هواپیما $f=1,2,...,12$

i,j: اندیس نشاندهنده کمانهای پرواز $i,j=1,2,...,60$

t: ساعت شروع پرواز $t=1,2,...,2016$ به صورت گسسته با فواصل ۵ دقیقه در طول یک هفته

c: اندیس نشاندهنده گروه خدمه $c=1,2,...,240$

متغیرها:

در ادامه به تشریح هر یک از متغیرهای موجود در مدل پرداخته می‌شود.

هواپیمای f کمان j را بعد از کمان i در زمان t پرواز می‌کند.

$$X_{f,i,j,t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

در این متغیر t به معنای زمان شروع پرواز در کمان j می‌باشد و نباید با طول بازه زمانی انجام این کمان اشتباه گرفته شود.

$X_{f,i,j,t}$ متغیر اصلی در این مدل می‌باشد و بعد از حل مدل، متغیرهایی که مقدار یک می‌گیرند عملاً برنامه پرواز هر هواپیما را تعیین می‌کنند و مشخص می‌شود که هر هواپیما در چه ساعتی، چه کمانی را پرواز می‌کند.

خدمه c کمان j را پس از کمان i و در شیفت کاری متفاوت با کمان i انجام داده‌اند

$$BDS_{c,i,j}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

خدمه c پرواز کمان j را بعد از i در زمان t انجام می‌دهد.

$$Y_{c,i,j,t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

$Y_{c,i,j,t}$ متغیراصلی مربوط به خدمه‌پروازی می‌باشد. بعد از حل مدل این متغیرها مقدار صفر و یک می‌گیرند و برنامه پروازی خدمه را تشکیل می‌دهند.

هواپیمای f پس از پرواز کمان j در قطب است.

$$FH_{f,j}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

هر هواپیما پس از طی مدت معینی پرواز باید فرآیندهای کنترل و تعمیر و نگهداری را طی کندکه این عملیاتها در فرودگاه قطب(فرودگاه مرکزی و اصلی در شبکه پروازی که کلیه تسهیلات و تمرکز شرکت هوایی در آن واقع می‌باشد) انجام می‌شود. برای اعمال این محدودیت در مدل لازم است متغیر فوق تعریف شود.

از آنجا که لازم است خدمه پروازی بعد از مدت معینی پرواز (۸ساعت)، الزاما چند ساعت استراحت داشته باشند (۱۰ ساعت). برای این کار لازم است متغیر فوق تعریف گردد تا مشخص شود خدمه پروازی پس از کدام پروازها در ایستگاه هستند.

هواپیمای f در انتهای پرواز J در قطب باشد و پرواز K بلافاصله پس از پرواز J باشد یا بین پروازهای j و k در هیچ قطبی نباشد.

$$FHA_{f,j,k}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

با توجه به اینکه هر هواپیما مدت زمان محدودی را می‌تواند بدون انجام عملیات تعمیر و نگهداری، پرواز کند لذا لازم است که مدت زمان پرواز هواپیما بعد از آخرین ورودش به فرودگاه قطب مورد محاسبه قرار گیرد. این مقدار با استفاده از متغیر فوق محاسبه می‌شود.

خدمه c با شروع شیفت کاری از کمان j پس از انجام کمان k وارد ایستگاه می‌شوند

$$CSA_{C,j,k}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$$

در غیر این صورت

با استفاده از متغیر $CSA_{c,j,k}$ مدت زمان پرواز خدمه بعد از آخرین ورودشان به ایستگاه محاسبه می‌شود. واین به این معنا می‌باشد که برای کمان‌های بین j و k ، و همچنین کمان‌هایی که مربوط به شیفت پروازی که با کمان j شروع می‌شود نمی‌باشند مقدار $CSA_{c,j,k}$ صفر می‌باشد. همانطور که گفته شده خدمه پس از ورود به ایستگاه و قبل از شروع شیفت کاری بعدی باید چند ساعت استراح داشته باشند. این متغیر برای یافتن آخرین کمان یک شیفت کاری و اولین کمان شیفت بعدی خدمه می‌باشد. فاصله زمانی بین این دو کمان باید به اندازه‌ای باشد که خدمه به اندازه کافی استراحت نمایند.

$DF_{f,j}$ = زمان زمین‌گیر بودن هواپیمای f قبل از پرواز کمان j

$DC_{c,j}$ = مدت استراحت خدمه c قبل از انجام کمان پرواز j

Archive of SID

www.SID.ir

متغیر کمکی برای محاسبه متغیر FHA $TMP_{f,j,k} = \{0,1,2\}$

یک متغیر کمکی برای محاسبه متغیر CSA $CTMP_{c,j,k} = \{0,1,2\}$

یک متغیر کمکی برای محاسبه متغیر BDS $TMPC_{c,j,k} = \{0,1,2\}$

پارامترها:

در ادامه هر یک از پارامترهای موجود در مدل به تفکیک تشریح می‌شوند:

هواپیمای f می‌تواند کمان j را انجام دهد.

$$CF_{f,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

در غیر این صورت

از آنجا که هواپیماها از محدودیتهایی مانند ظرفیت سوخت، ظرفیت مسافر و حداکثر مسافت پروازی (برد)، برخوردار می‌باشند لذا این پارامتر محدودیت هواپیماها را در مورد انجام پروازها نشان می‌دهد.

LS_j= کران پایین بازه زمانی مجاز برای انجام کمان j

US_j = کران بالای بازه زمانی مجاز برای انجام کمان j

این پارامترها تواماً بازه زمانی مجاز برای انجام کمان j را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در زمان انجام پروازها محدودیت‌هایی وجود دارد که عمدتاً ناشی از زمان پرواز و فرود به ترتیب از فرودگاههای مبدأ و مقصد به لحاظ شدت ترافیک هوایی، آلودگی صوتی برای کاربریهای مسکونی مجاور فرودگاه در برخی ساعتها و ظرفیت فرودگاهها می‌باشند. لذا لازم است که درباره هر پرواز بازه زمانی مجاز از قبل مشخص شده و به مدل تفهیم شود.

انتهای پرواز i و انتهای پرواز j یک شهر باشد.

$$Same_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

در غیر این صورت

شهر مقصد کمان پروازی j قطب می‌باشد.

$$IsHub_j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

در غیر این صورت

این پارامتر می‌کوشد که پروازها تا حدامکان به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شوند که هواپیما در انتهای سیکل پروازی در فرودگاه قطب قرار گیرد.

حداکثر زمان مجاز برای پرواز هواپیمای f $Max\,Flight$

با توجه به اینکه هر هواپیما پس از انجام مدت معینی پرواز باید کنترلهای تعمیر و نگهداری متناظر با نوع ناوگان خود را پشت سر بگذارد، لذا برای هر هواپیما محدودیت حداکثر مدت زمان مجاز پرواز وجود دارد که با پارامتر MaxFlight در مدل نشان داده می‌شود.

خدمه c روی هواپیمای f کار می‌کنند.

$$Crew_{c,f} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

در غیر این صورت

از آنجایی که هر هواپیما بر اساس نوع ناوگان، نیاز به خدمه‌های متخصص و منحصر به خود را دارد لذا لازم است مشخص شود که هر گروه از خدمه پرواز با کدامیک از هواپیماها، مجاز به پرواز هستند. این محدودیت با پارامتر فوق تنظیم می‌شود.

مقصد کمان پروازی j یک ایستگاه است.

$$Is\,Station_J = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

در غیر این صورت

با توجه به اینکه خدمه بیشتر از یک مدت زمان معین نمی‌توانند پرواز کنند و بعد از انجام این مدت پرواز، مدت زمان موظفی پرواز آنها به اتمام رسیده و باید وارد دوره استراحت شوند لذا باید برنامه پروازها به‌گونه‌ای تنظیم شود که خدمه پس از انجام پرواز موظفی در ایستگاه باشند.

مدت زمان پرواز کمان j با هواپیمای f $Len_{f,j} =$

این پارامتر طول زمان کمان پروازی i با هواپیمای f را نشان می‌دهد. در ادامه ضابطه کلی مدل ریاضی برنامه زمان‌بندی پرواز ارائه می‌شود. مدل حاضر که به‌عنوان دستاورد یک تحقیق می‌باشد در این مقاله به‌صورت یک مدل پنج هدفه ارائه می‌شود که تمامی زیر مسائل برنامه‌ریزی پرواز را به صورت یکپارچه در نظر گرفته است و مسأله برنامه‌ریزی پرواز را در حالتی که تمامی اجزاء و زیر مسائل آن به طور پیوسته با یکدیگر در تعامل هستند، فرموله می‌کند. با توجه به اینکه این مدل یک مدل چند هدفه می‌باشد به منظورتسهیل در فرآیند حل، مجموع توابع هدف به عنوان یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شودکه سعی در بیشینه کردن سود شرکت هوایی دارد و سایر توابع هدف که سعی در به‌حداقل رساندن هزینه‌ها دارند به‌عنوان توابع جریمه در ضابطه کلی تابع هدف قرار می‌گیرند. در این قسمت پس از تشریح توابع هدف، هر یک از قیود موجود در مدل ارائه شده، به تفکیک بررسی و تشریح می‌شوند.

توابع هدف مطابق زیر خواهد بود:

$$Max \sum_f \sum_i \sum_j \sum_t \min(Capacity_f, Available_i) \times x_{f,i,j,t} \times \Pr ofit_i \quad (۱)$$

تابع هدف (۱) کل درآمد خط هوایی که متشکل از مجموع فروش بلیط پرواز به ازای هر نفر است را بیشینه می‌کند و در آن *Capacity* ، *Available* و *Profit* به ترتیب ظرفیت هواپیما تخصیص داده شده به پرواز ، تعداد مسافران موجود و درآمد حاصل از هر مسافر می‌باشد.

$$Min \sum_f \sum_i (Available_i - \sum_j \sum_t Min \quad (۲)$$

$$(Capacity_f, Available_i) \times x_{f,i,j,t})) \times profit_i$$

تابع هدف رابطه (۲) هزینه مسافران از دست داده شده (از دست رفته) را کمینه می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

$$Min \sum_i \sum_t DF_{f,j} \times t \times (1 - ISHub_i) \times Parking_i \qquad (۳)$$

تابع هدف در رابطه (۳) هزینه پارکینگ ساعتی برای توقف هواپیما در خارج از فرودگاه قطب خودش را کمینه می‌کند.

$$Min \sum_j \sum_t DC_{c,j} \times (1 - ISStation_j) \times Crew\ Night_j \qquad (۴)$$

تابع هدف ضابطه (۴) ، هزینه توقف ساعتی خدمه در خارج از ایستگاه خودشان را کمینه می‌کند.

$$Min \sum_i (1 - \sum_f \sum_j \sum_t x_{f,i,j,t}) \times Available_i \times \Pr ofit_i \qquad (۵)$$

تابع هدف (۵) ، هزینه کمانهای پروازی اختصاص نیافته را کمینه می‌کند.

توابع هدف مورد اشاره در معادلات (۱) تا (۵) مطابق با یکسری قیود می‌باشند که در ادامه آورده می‌شوند.

$$\sum_f \sum_{i \cup \{0\}} \sum_t x_{f,i,j,t} = 1 \ \forall j \qquad (۶)$$

$$\sum_f \sum_{j \cup \{0\}} \sum_t x_{f,i,j,t} = 1 \ \forall i \qquad (۷)$$

قیود (۶) و (۷) نشان می‌دهند که تمامی کمانهای پروازی باید انجام شوند یعنی به ازای هر کمان پروازی j که در قسمت ۱-۲ اشاره شد، باید یک هواپیما و یک ساعت پرواز تخصیص داده شود.

$$\sum_t \sum_i \sum_t x_{f,i,j,t} \times CF_{f,j} \times Same_{i,j} = 1 \quad \forall j \qquad (۸)$$

قید (۸) تضمین می‌کند که هواپیمای تخصیص داده شده به کمان پروازی j مجاز به انجام این پرواز می‌باشد.

قید (۹) برای تضمین پیوستگی مسیر هواپیماها لازم است.

$$LS_j \le \sum_i \sum_f \sum_t t \times x_{f,i,j,t} \le US_j \qquad \forall f \qquad (۹)$$

قید (۹) تضمین می‌کنند که زمان تخصیص داده شده به هر کمان پروازی j در بازه زمانی مجاز آن قرار بگیرد.

$$DF_{f,j} = \sum_t \sum_i x_{f,i,j,t} \left(t - \sum_{k,t_1} t_1 \times x_{f,k,i,t} - Len_{f,i} \right) \quad \forall_{f,j} \qquad (۱۰)$$

قید (۱۰) متغیر DF را مقداردهی می‌کند. همانطور که قبلاً بیان شد این متغیر زمان زمین‌گیر بودن هواپیمای f قبل از پرواز j را نشان می‌دهد

$$DF_{f,j} \times DF_{f,j} \ge DF_{f,j} \times A_{turn} \qquad \forall_{f,j} \qquad (۱۱)$$

در این قید A_{turn} زمان چرخش هواپیما یعنی زمان لازم برای سوخت‌گیری و تخلیه بار و مسافر و سوار کردن بار و مسافر برای پرواز بعدی یا به عبارت دیگر کمترین زمان لازم بین یک نشست و برخاست متوالی می‌باشد. این قید برای مقاوم[1] کردن برنامه در جهت کم کردن تأثیر تأخیرهای برنامه‌ریزی نشده به کار می‌رود تا برنامه پروازی هواپیماهای موجود در شرکت هوایی در برابر آشفتگی‌های غیرقابل پیش‌بینی مانند شرایط نامساعد جوی و یا خرابی هواپیما، متحمل تغیرات اساسی نشود. به عبارت دیگر با استفاده از این قید زمان زمین‌گیر بودن هواپیما بیش از کمترین مقدار مور نیاز در نظر گرفته می‌شودبدین‌ترتیب برنامه پرواز تولیدشده از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار خواهد بود.

$$FH_{f,j} = \sum_i \sum_t x_{f,i,j,t} \times Ishub_j \qquad \forall_{f,j} \qquad (۱۲)$$

قید(۱۲) متغیر FH را مقداردهی می‌کند. از آنجا که هواپیماها پس از طی مدت زمان معینی باید در قطب باشند تا کنترلهای تعمیر و نگهداری روی آن انجام شود، لذا لازم است مشخص شود که آیا هواپیما پس از انجام کمان پروازی j در قطب قرار می‌گیرد یا خیر.

$$TMP_{f,j,k} = FH_{f,j} + \sum_t x_{f,j,k,t} + \sum_i \sum_t FHA_{f,j,i} \times x_{f,i,k,t} \times \left(1 - FH_{f,i}\right) \forall f,j,k \qquad (۱۳)$$

قید (۱۳) متغیر کمکی TMP را که یک متغیر شمارش‌گر است، مقداردهی می‌کند، این متغیر تنها در صورتی ۲ می‌شود که مقصد کمان j قطب باشد و همچنین یکی از ۲ حالت زیر اتفاق بیفتد، یا کمان k بلافاصله پس از کمان j انجام شود ویا بین کمان j و k هیچ قطبی نباشد. در غیر این صورت مقدار این متغیر ۰ یا ۱ می‌باشد.

$$TMP_{f,j,k} - 1 \le 2 \times FHA_{f,j,k} \le TMP_{f,j,k} \ \forall f,j,k \qquad (۱۴)$$

قید (۱۴) متغیر FHA را مقداردهی می‌کند. بنابراین اگر مقدار $TMP_{f,j,k}$=2 باشد داریم $FHA_{f,j,k}$=۱ و در غیر این صورت $FHA_{f,j,k}$=۰.

$$\sum_k FHA_{f,j,k} \times Len_{f,k} \le Max\ flight_f \ \forall f,j \qquad (۱۵)$$

قید (۱۵) بیانگر این نکته است که مدت زمانی را که یک هواپیما بدون اینکه وارد قطبی شود پرواز می‌کند، باید از حداکثر زمان مجاز پرواز هواپیما کمتر باشد.

[1] . *Robust*

Archive of SID

www.SID.ir

$$\sum_{c}\sum_{j\cup\{0\}}\sum_{t} y_{c,i,j,t} = 1 \quad \forall i \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{c}\sum_{i\cup\{0\}}\sum_{t} y_{c,i,j,t} = 1 \quad \forall j \qquad (۱۷)$$

قیود (۱۶) و (۱۷) نشان می‌دهند که به هر پرواز یک گروه خدمه تخصیص یابد.

$$\sum_{t}\sum_{j} Y_{c,0,j,t} = 1 \quad \forall c \qquad (۱۸)$$

قید (۱۸) پیوستگی پروازهای خدمه را تضمین می‌کند.

$$\sum_{t,f,c}\left(\sum_{i} y_{c,i,j,t}\right)\left(\sum_{i} x_{f,i,j,t}\right)\times crew_{c,f} = 1 \quad \forall j \qquad (۱۹)$$

قید (۱۹) تضمین می‌کند که به هر کمان پروازی یک گروه خدمه پروازی و یک هواپیما همزمان تخصیص داده شود.

$$CS_{c,j} = \sum_{i,t} y_{c,i,j,t} \times Is\ Station\ \ j \quad \forall c, j \qquad (۲۰)$$

قید (۲۰) متغیر CS را مقداردهی می‌کند. با توجه به اینکه خدمه پروازی مدت زمان محدودی را می‌توانند بدون استراحت پرواز کنند، لذا لازم است مشخص شود خدمه پس از انجام کمان j در قطب هستند یا خیر.

$$CTMP_{c,j,k} = CS_{c,j} + \sum_{t} y_{c,j,k,t} + \sum_{i}\sum_{t} CSA_{c,j,i} \times y_{c,j,k,t} \times (1 - CS_{c,i}) \quad \forall c, j, k \qquad (۲۱)$$

قید (۲۱) متغیر کمکی CTMP را مقداردهی می‌کند. این متغیر تنها در صورتی ۲ می‌شود که مقصد کمان j ایستگاه باشد و همچنین یکی از دو حالت زیر اتفاق بیفتد، یا خدمه c کمان k را بلافاصله پس از کمان k انجام دهند و یا خدمه c بین کمان j و k در هیچ ایستگاهی نباشند. در غیر این صورت مقدار این متغیر ۰ یا ۱ می‌شود.

$$CTMP_{c,j,k} - 1 \le 2 \times CSA_{c,j,k} \le CTMP_{c,j,k} \quad \forall c, j, k \qquad (۲۲)$$

قید (۲۲) متغیر CSA را مقداردهی می‌کند. بنابراین اگر مقدار $CTMP_{f,j,k}=2$ باشد داریم $CSA_{c,j,k}=1$ و در غیر این صورت $CSA_{c,j,k}=0$.

$$\sum_{k} CSA_{c,j,k} \times Len_{k} \le Max\,work_{c} \quad \forall c, j \qquad (۲۳)$$

قید (۲۳) تضمین می‌کند که مدت زمانی که یک گروه خدمه بدون اینکه وارد ایستگاهی شود پرواز کند باید کمتر از بیشترین مدت مجاز پرواز خدمه(معمولاً ۸ ساعت) باشد.

$$DC_{c,j} = \sum_{i,t} y_{c,i,j,t} \times \left(t - \sum_{k,t_1} t_1 \times y_{c,k,i,t_1} - Len_{,i}\right) \quad \forall c, j \qquad (۲۴)$$

قید (۲۴) متغیر DC را مقداردهی می‌کند و در آن t_1 زمان شروع انجام کمان i پس از کمان k و با استفاده از خدمه c می‌باشد. به عبارت دیگر با استفاده از این قید مدت زمان زمین‌گیر بودن خدمه c ، قبل از پرواز j مشخص می‌شود.

۳. حل مدل و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

در جدول (۳-۱) نوع و تعداد متغیرهای موجود در مدل نشان داده شده است.همان‌طورکه مشاهده می‌شود بیشتر متغیرها از نوع صفر-یک می‌باشند.مجموع تعداد متغیرها در مدل نیز نزدیک به دو میلیارد متغیر می‌باشد که به وضوح نشاندهنده بزرگی مقیاس مدل می‌باشد. بنابراین فضای مسأله، دو میلیارد بعدی می‌باشد.لذا هر جواب شدنی در این فضا برداری با دو میلیارد متغیر خواهد بود.

بزرگ مقیاس بودن مدل، و نوع متغیرها که عدد صحیح می‌باشند، باعث می‌شود تا درجه پیچیدگی مدل بالا رفته و به اصطلاح مدل از نوع NP-Hard (مدلهای بغرنج که با روشهای معمول تحقیق در عملیات حل نمی‌شوند) باشد.

لذا برای حل مدل باید از روشهای ابتکاری استفاده کرد. الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای بهینه‌سازی است که در آن از تکامل و توارث در موجودات زنده الهام گرفته شده است و به کمک روشهای ریاضی و کامپیوتری بر قدرت آن افزوده می‌شود. الگوریتم ژنتیک که جزو روشهای جستجوی تصادفی به شمار می‌رود دارای این مزیت مهم است که به جای جستجو از یک نقطه اولیه، همزمان از چند نقطه اولیه شروع می‌کند و در واقع کار را با یک جمعیت شروع می‌کند و در طی فرآیند سعی در بهبود نسلهای بعدی دارد تا به جواب بهینه برسد.

برخی تفاوتهای الگوریتم ژنتیک با دیگر روشهای بهینه‌سازی به شرح زیر است:

- الگوریتم ژنتیک به جای اینکه از یک نقطه شروع کند، با یک جمعیت از نقاط به طور همزمان شروع می‌کند و لذا احتمال یافتن نقطه بهینه مطلق نسبت به روشهای جستجوی ریاضی (مثل گرادیان تابع هدف) که نقطه به نقطه حرکت می‌کنند، بیشتر است.
- الگوریتم ژنتیک به طور مستقیم از تابع هدف و توابع محدودیت استفاده می‌کند و نیازی به اطلاعات دیگر نظیر گرادیان و خطی‌سازی حول نقطه کار ندارد. بنابراین برای کار با توابع هدف پیچیده مناسب است.
- الگوریتم ژنتیک به جای قوانین تصمیم‌گیری و ریاضی، از قوانین احتمال استفاده می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

- مکانیزم عملکرد الگوریتم ژنتیک بسیار ساده و به راحتی قابل پیاده‌سازی با کامپیوتر می‌باشد.
- بر خلاف روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی که فقط برای توابع هدف و محدودیت با قالب به خصوصی مورد استفاده قرار می‌گیرند، الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل بهینه‌سازی حتی با توابع هدف و قید غیرخطی و گسسته و چند ضابطه‌ای و غیرمحدب، متغیرهای مستقل و عدد صحیح و ... به سادگی به کار می‌رود.

الگوریتم ژنتیک با سرعت قابل قبول به جوابهای مناسبی می‌رسد. اگرچه ممکن است الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه مطلق نرسد، اما برای مسائل بهینه‌سازی که در آنها زمان انجام محاسبات اهمیت زیادی دارد، بسیار مناسب است. البته در حل مسائل بهینه‌سازی که دارای فضای جستجوی بزرگ و متغیرهای مستقل زیاد می‌باشند و استفاده از روشهایی مثل یکایک شماری بسیار زمان بر و غیر منطقی می‌باشد نیز، می‌توان از الگوریتم ژنتیک نهایت بهره را برد.

جدول۱. متغیرهای موجود در مدل

نام متغیر	نوع متغیر	تعداد در مدل
$X_{f,i,,j,t}$	صفر-یک	۸۷۰۹۱۲۰۰
$Y_{c,i,,j,t}$	صفر-یک	۱۷۴۱۸۲۴۰۰۰
$FH_{f,j}$	صفر-یک	۷۲۰
$CS_{c,j}$	صفر-یک	۱۴۴۰۰
$DF_{f,j}$	حقیقی	۷۲۰
$DC_{c,j}$	حقیقی	۱۴۴۰۰
مجموع		۱۸۲۸۹۴۵۴۴۰

در این قسمت روش پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای مدل زمان‌بندی پرواز تشریح می‌شود. در ساختار کروموزوم طراحی شده برای مسأله زمان‌بندی پرواز هر ژن یک کمان پروازی را نشان می‌دهد، که خود یک آرایه است که شامل شماره هواپیمای تخصیص داده شده به آن و شماره خدمه مربوطه و زمان شروع پرواز می‌باشد. سپس این کروموزوم به صورت تصادفی مقدار دهی می‌شود، البته مقدار دهی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که کروموزوم تولید شده، شدنی باشد.

برای مثال؛ ژن اول را درنظر بگیرید؛ برای مقداردهی به این ژن ابتدا از میان هواپیماهای موجود، هواپیماهایی که می‌توانند کمان پروازی اول را انجام دهند تعیین شده و سپس یکی از آنها به تصادف انتخاب می‌شوند. پس از تعیین هواپیما، خدمه‌های مجاز از میان خدمه‌هایی که در حال حاضر در شهری که هواپیما در آن زمین‌گیر است، می‌باشند تعیین شده و یکی از آنها به تصادف انتخاب می‌شود و در نهایت زمان شروع پرواز در ژن مربوطه تثبیت خواهدشد.

در گام دوم جمعیت اولیه تشکیل می‌شود که متشکل از تعدادی کروموزوم می‌باشد. در این مقاله جمعیت اولیه شامل ۱۰۰ کروموزوم می‌باشد. تابع احتمال در عملگر ترکیب[1] ۰،۱ باشد.مقدار تابع احتمال برای عملگر جهش نیز ۰،۲ نظرگرفته شده است.تعداد تکرار الگوریتم در فرآیند حل، ۵۰۰ بار تکرار را لحاظ می‌کند.

۳-۱. عملگر ترکیب

در این گام از الگوریتم کروموزوم‌ها به طور تصادفی و بر اساس مقدار تابع هدفشان دو به دو انتخاب شده و با هم ترکیب می‌شوند و کروموزوم‌های بهتر با مقدار تابع هدف مطلوب تر را تشکیل می‌دهند.

نقش تابع هدف در انتخاب دو کروموزوم بدین گونه است که کروموزومی که مقدار تابع هدف بیشتری دارد شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارد. با توجه به اینکه می‌خواهیم شدنی بودن کروموزوم‌ها پس از ترکیب حفظ شود لذا یک تغییر جزئی در روش انجام ترکیب اعمال شده است. بدین ترتیب که تعدادی تصادفی از ژنها در کروموزوم اول انتخاب می‌شود و ناوگان هواپیمای مربوطه در صورت امکان با ناوگان ژن معادل در کروموزوم دوم تعویض می‌شود.

۳-۲. عملگر جهش

از عملگر جهش به منظور پیمایش قسمتهای مختلف فضای جواب یافتن جوابهای بهتر استفاده می‌شود. در الگوریتم مربوط به مدل برنامه‌ریزی پرواز، این عملگر به شکل زیر پیاده‌سازی شده است:

ابتدا بعضی از ژنها که نشاندهنده کمانهای پروازی هستند به تصادف انتخاب می‌شوند سپس ناوگان مربوط به آنها در صورت امکان با ناوگانهای دیگر تعویض می‌شود و الگوریتم با کروموزوم‌های جهش یافته ادامه می‌یابد. تعداد دفعات تکرار الگوریتم یکی از پارامترهایی است که قبل از شروع حل تنظیم می‌شود. در هر تکرار کروموزوم‌های جدیدی از ترکیب کروموزوم‌های قبلی حاصل می‌شود و در واقع نسلهای جدید جمعیتی ایجاد می‌شود.

در هر تکرار مقادیر تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه شده و بهترین جواب ذخیره می‌شود. همچنان‌که الگوریتم اجرا می‌شود جوابها بهتر و بهتر می‌شوند تا اینکه الگوریتم به واسطه رسیدن به شرط توقف پایان می‌یابد. شرط توقف می‌تواند تعداد تکرار ها یا میزان بهبود در بین دو یا چند تکرار متوالی باشد.

همان‌گونه که اشاره شده بود، مدل مذکور برای داده‌های واقعی یک شرکت هواپیمایی داخلی به کمک الگوریتم ژنتیک حل شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک در جدول ۱ بیان شده است. جدول ۱ زمان شروع پرواز هر کمان پروازی و هواپیمای تخصیص داده شده و خدمه پروازی مربوطه را بیان می‌کند.

[1] *Cross Over*

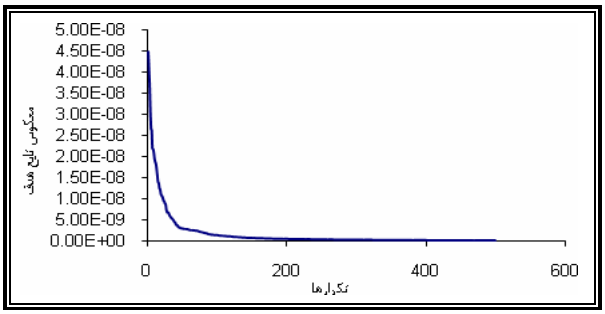
Archive of SID

www.SID.ir

در واقع این جدول خروجی مدل ارائه شده می‌باشد و به عنوان برنامه زمان‌بندی پرواز خط هوایی تلقی می‌شود. خروجی مدل براساس اطلاعات پروازهای خارجی شرکت هواپیمایی در طول یک هفته سازگار شده است .در این مقاله تنها برنامه پرواز متناظر با ۳۰ کمان پرواز به‌عنوان بخشی از خروجی مدل در جدول ۲ نشان داده شده است. جهت ارزیابی ماتریس‌های برنامه‌ریزی پرواز مربوط به تکرارهای مختلف، از معکوس مقادیر متناظر تابع هدف در هر تکرار استفاده شده است. به این مفهوم که در هر تکرار با یک مقدار تابع هدف که در حقیقت برابر میزان سوددهی نهایی می‌باشد روبرو خواهیم بود. با هر بار تکرار این میزان افزایش می‌یابد. استفاده از معکوس مقدار تابع هدف به جهت لحاظ کردن یک کمینه مناسب در نمودار همگرایی می‌باشد به‌گونه‌ای که با بهینه شدن جوابها بتوان به آن میزان کمینه همگرا شد. شکل ۱ روند همگرایی الگوریتم حل مسأله در تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲. زمان شروع پرواز هر کمان پروازی و هواپیمای تخصیص داده شده و خدمه مربوطه

Leg ID	Start Time	Aircraft ID	Crews
1	9:00:00	7	4
2	19:00:00	7	21
3	9:00:00	11	6
4	19:00:00	11	22
5	9:00:00	12	5
6	19:00:00	12	23
7	5.08:00:00	10	14
8	5.19:00:00	10	4
9	5.05:00:00	3	7
10	5.12:00:00	3	41
11	7:00:00	1	1
12	14:00:00	1	61
13	5.07:00:00	1	8
14	5.14:00:00	1	1
15	8:00:00	2	2
16	17:00:00	2	81
17	1.05:00:00	4	8
18	1.17:00:00	4	2
19	3.05:00:00	8	2
20	3.17:00:00	8	8
21	6.05:00:00	11	1
22	6.17:00:00	11	2
23	11:00:00	10	7
24	16:00:00	10	101
25	1.06:00:00	11	9
26	1.10:40:00	11	7
27	1.08:00:00	1	11
28	1.16:00:00	1	121
29	1.08:00:00	12	10
30	1.16:00:00	12	141



شکل ۱. نمودار همگرایی تکرارها

۴. نتیجه گیری

فرایند برنامه‌ریزی پرواز، همواره به‌عنوان یک مسأله پیچیده که دارای المانها و محدودیتهای بسیار است تلقی می‌شود. مسأله‌ای که خود دربرگیرندهٔ چندین زیرمسأله است که در تعامل با یکدیگر تشکیل یک سیستم بغرنج را می‌دهند. برنامه‌ریزی پرواز در شرکتهای هواپیمایی به قسمتهای مختلف شرکت و متعاقباً کارشناسان متعدد در هر قسمت وابسته است و روند بازخوردی فرآیند برنامه‌ریزی پرواز در ارتباط با هر قسمت و همچنین ارتباط قسمتهای ذیربط با یکدیگر بر پیچیدگی و وابستگی این سیستم می‌افزاید. به‌گونه‌ای که روند فرایند برنامه‌ریزی کند بوده و همگرایی قسمتهای مختلف مرتبط با این فرآیند، در رسیدن به جواب نهایی با نرخ بسیار کندی صورت می‌گیرد. این امر باعث می‌شود که بازهٔ زمانی طراحی یک برنامه پرواز عملیاتی، طولانی باشد. به‌طوری که در بعضی مواقع فرایند مذکور شش ماه به طول می‌انجامد. همچنین نمی‌توان انتظار داشت که برنامه ارائه شده مناسب با شرایط حاکم باشد. زیرا سیاستهای خرد و کلان شرکت هوایی به طور همگن و همچنین متمرکز در آن لحاظ نشده است. در این مقاله برای نخستین بار مسأله برنامه‌ریزی پرواز با تلفیق تمامی زیرمسأله‌ها به طور پیوسته با یکدیگر به صورت یک مدل ریاضی بزرگ مقیاس چندهدفه ارائه شد. حل مسأله پیش رو که هم به عنوان یک مسأله چندهدفه (Multi-objective) تلقی می‌شود و هم با مدنظر گرفتن گستردگی زیرمسأله‌های تشکیل‌دهندهٔ آن یک مسأله اصطلاحاً چندمسأله‌ای (Multi-problem)، چالش اصلی اتخاذ چنین رویکردی می‌باشد. اولین مشکل پیش‌رو، امکان تبدیل چنین مسأله‌ای با گستردگی و پراکندگی بسیار متغیرها، پارامترها و قیود آن به یک مدل ریاضی یکپارچه و مستقل بود. پس از پشت سر گذاشتن این چالش برای اثبات صحت اتخاذ رویکرد جدید در برنامه‌ریزی پرواز، نیاز به حل مدل ارائه شده بر اساس یک مورد مطالعاتی واقعی کاملاً محسوس می‌باشد. لذا با توجه به خصوصیات ذاتی مدل، حل آن تنها به کمک روشهای فوق ابتکاری ممکن خواهد بود که در این مقاله، الگوریتم ژنتیک، با توجه به سازگاریهای مناسب آن و همچنین سرعت بالای آن در پیمایش فضای جواب و فرآیند همگرایی در مقایسه با سایر الگوریتمهای فراابتکاری برای

Archive of SID

www.SID.ir

فرایند حل انتخاب شد. مدل مذکور با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای داده‌های واقعی پروازهای یک شرکت هوایی داخلی پیاده‌سازی شد. مدل ریاضی ارائه شده با ابعاد بسیار بزرگی که دربرگیرندهٔ نزدیک به دو میلیارد متغیر و دو میلیون قید می‌باشد، بر اساس اطلاعات شرکت مذکور حل گردید. ابعاد مدل گویای این نکته می‌باشد که فضای جواب مدل، یک فضای دو میلیارد بعدی است که هر جواب شدنی در این فضا، برداری با دو میلیارد مؤلفه خواهد بود. لذا یافتن یک جواب شدنی بهینه در این فضای بسیار بزرگ، قطعاً دشوار می‌باشد.

لذا پس از انجام سعی و خطاهای بسیار و مطالعات گسترده بر روی شاخصهای عملیاتی برنامه پرواز و همچنین محدودیت‌های حاکم بر فضای عملیات، الگوریتم ژنتیک مناسبی متناظر با شرایط موجود طراحی و پیاده‌سازی شد که توانست مسأله برنامه‌ریزی پرواز را برای شرکت مذکور در مدت هفت دقیقه حل کند و خروجی آن یک برنامه زمان‌بندی کامل باشد که با شرایط حاضر تا حد بسیار زیادی منطبق بوده و بسیاری از محدودیت‌های وارد بر سیستم حمل و نقل هوایی کشور را مدنظر قرار می‌دهد.

با اتخاذ چنین رویکردی، مسأله برنامه‌ریزی پرواز دیگر مسأله‌ای وابسته به قسمتها و افراد مختلف در یک شرکت نخواهد بود و این امر از پیچیدگی این سیستم به شدت می‌کاهد. همچنین فرایند برنامه‌ریزی پرواز دیگر فرایندی درازمدت که گاهی تا شش ماه نیز طول می‌کشد نبوده و این مهم شرکتهای هواپیمایی را قادر می‌سازد تا با اتکاء به زمان بسیار اندک رسیدن به یک جواب بهینهٔ برنامه‌ریزی پرواز، فرایند مذکور را به صورت پویا دنبال کنند. زیرا در مسأله برنامه‌ریزی پویا، نکتهٔ مهم حداقل زمان برنامه‌ریزی قبل از انجام عملیات پرواز می‌باشد که می‌توان برنامه را بر اساس داده‌های جدید نسبت به زمان، ارتقاء داده و خروجی منطبق با شرایط حاضر را برای عملیات منتشر نمود.

لذا رسیدن به یک برنامه زمان‌بندی کامل پرواز، که شامل مبداء و مقصد پرواز، زمانهای ورود و خروج هواپیما، نوع ناوگان، تعیین هواپیمای مناسب با توجه به محدودیت‌های عملیات تعمیر و نگهداری در هر ناوگان و خدمه پروازی متناظر و مناسب باشد در مدت ۷ دقیقه و ارائه یک نرم‌افزار کاملاً کاربردی و مناسب برای کاربر، دستاورد بزرگی است که به شرکتهای هواپیمایی اجازه می‌دهد که در زمان بسیار اندک، امکان تغییر در برنامه پرواز را در راستای افزایش مطلوبیت مسافر و سود شرکت داشته باشند و در هر شرایطی با اتخاذ تصمیم‌گیریهای استراتژیک و تاکتیکی مبتنی بر پایه‌های علمی و ریاضیاتی، در فضای رقابتی موفق عمل نمایند.

منابع

[1]. Yu, G., Thengvall, *Optimization In The Airline Industry, Handbook Of Applied Optimization- Edited By P.M.* Pardalos And M.G.C. Resende, Oxford University Press, New York, B. 2002.

[2]. Janic, M., *Air Transport System Analysis and Modeling Capacity*, Quality of Service and Economics, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2000.

[3]. Dontzige, G.B., Ferguson, A.R., *"The Problem of Routing-A Mathematical Solution*", Government Res. Report. Federal Clearinghouse, AD604345, 1954.

[4]. Daskin, M.S., Panayoyopoulos, N.D., *A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Networks"*, Transportation Science, Vol. 23, pp. 91-99, 1989.

[5]. Abara, J., *"Applying Integer Linear Programming To The Fleet Assignment Problem*", Inter Face, 19, 1984.

[6]. Hane, C.A., Barnhart, C., Johnson, E.L., Marsten, R.E., Nemhauser, G.L., Sigismondi, G., "*The Fleet Assignment Problem: Sovling A Large- Scale Integer Program*," Mathematical Programming, vol.70, pp.211-232, 1995.

[7]. Rexing, B.T., *"Fleet Assignment With Time Windows*", Master Thesis, Massachusetts Institute Of Technology, 1997.

[8]. Lochan, R.C., *"Lorg Haul Fleet Assignment: Models, Methods and Application Master Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 1995.

[9]. Gopalan, R., Talluri, K.T., *"The Aircraft Maintenance Routing Problem,"* Working paper, 1993.

[10]. Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., *"Maintenance and Crew Consideration in Fleet Assignment*", Transportation Science, Vol.30, pp.244-260, 1996.

[11]. Dobson, G., Lederer, P.J., *"Airline Scheduling and Routing In A Hub- And- Spoke System*", Transportation Science, Vol. 27, pp. 281-297, 1993.

[12]. Vance, P.H., Barnhart, C., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., *Airline Crew Scheduling: Airline New Formulation And Decomposition Algorithm*", Working Paper, 1994.

Archive of SID

www.SID.ir