

برنامه‌ریزی پرواز در افق زمانی کوتاه‌مدت

علیرضا رشیدی کمیجان*، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، فیروزکوه، ایران
نسیبه جمشیدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rashidi@azad.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۴/۰۶ - پذیرش: ۹۶/۰۹/۱۸

صفحه ۶۰-۴۵

چکیده

امروزه صنعت حمل و نقل هوایی، به عنوان یکی از مهمترین محورهای رشد در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، مطرح می‌باشد. بخش هوایی به دلیل رشد روز افزون و نیاز به توسعه زیر بنایی این صنعت، از اهمیت بسزایی برخوردار است. رقابت شدید بین خطوط هوایی و بالا رفتن سطح توقع مسافران، منجر به طرح مسائل پیچیده زمانبندی و برنامه‌ریزی شده است. به طوریکه نیازمند مدل‌ها و روش‌های جدید برای حل این گونه مسائل می‌باشد. مشکلات برنامه‌ریزی که این روزها مدیران فرودگاه و خطوط هوایی با آن مواجه می‌شوند بسیار پیچیده‌تر از مسائل برنامه‌ریزی سنتی می‌باشد. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای زمانبندی پروازهای یک فرودگاه در افق یک روزه ارائه شده که مواردی نظیر تخصیص ناوگان، تخصیص گیت و زمانبندی و توالی پروازها نیز در آن دیده شده است. در این مقاله، زمانبندی پروازها به صورتی انجام می‌گیرد که تعادل در بازه‌های زمانی مختلف ایجاد شود. به بیان دیگر، مدل سعی می‌کند از تراکم پروازها در یک یا چند بازه زمانی پرهیز کرده و پروازها را بطور متعادل در بازه‌های مختلف زمانی برنامه‌ریزی کند و در عین حال، محدودیتهای مختلف موجود در مسئله زمانبندی پرواز را نیز تضمین نماید. این مسأله به صورت یک مدل عدد صحیح مختلط مدلسازی و با روش دقیق به کمک نرم افزار GAMS حل شده است.

واژه‌های کلیدی زمانبندی پرواز، تخصیص ناوگان، تخصیص گیت

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر فرودگاه‌ها یکی از مراکز اصلی جا به جایی مسافر و کالاهای تجاری محسوب می‌شوند. مراکزی که با هدف اولیه حمل و نقل ایجاد شدند، هم اکنون با رشد روز افزون فن‌آوری ارتباطات و اطلاعات، افزایش حجم ارتباطات داخلی و خارجی، توسعه تجارت جهانی، حرکت دنیا به سمت ایجاد دهکده جهانی و همچنین پیچیده‌تر شدن عملیات فرودگاهی و افزایش رقابت در این زمینه به یکی از حوزه‌های گسترده مطالعاتی تبدیل شده‌اند. از جمله موضوعات عمده‌ای که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته است می‌توان به بررسی و برنامه‌ریزی ظرفیت و تجهیزات

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- تعیین توالی و زمانبندی پروازها

از اولین مطالعات انجام گرفته در زمینه تعیین تواتر پرواز، تحقیق [Teodorovic, 1983] است. در این تحقیق استفاده از تواترهای خاص با مقادیر ضریب اشغال مختلف و اثرات اقتصادی‌ای که بر شرکت می‌گذارد، مورد بررسی قرار گرفته شده است. [Teodorovic, Milica and Goran, 1994] مدلی برای طراحی شبکه خطوط هوایی و تعیین فرکانس پروازها ارائه کردند. داده‌های ورودی مقادیر تخمینی تعداد مسافران بین شهرهاست که دارای عدم قطعیت هستند، این پژوهشگران برای حل مسئله از تئوری مجموعه فازی استفاده نمودند. در مطالعه [Jaillet, Song and Yu, 1996] از مدل‌های براساس جریان برای طراحی شبکه‌ها با در نظر گرفتن ظرفیت استفاده شده است. منظور از جریان تعداد مسافرانی است که روزانه بین دو شهر پرواز می‌کنند. آن‌ها سه نوع سفر در نظر گرفتند، با یک توقف، با دو توقف، با چندین توقف و برای هر کدام از این سفرها مدلی ارائه نمودند. مدل‌های مذکور با روش‌های هیوریستیک حل شده‌اند و با داده‌های برد هوانوردی کشوری و ۳۹ شهر آمریکا مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

[Laderer and Nambimadom, 1998] در تحقیقی به بررسی رابطه بین فاصله شهرها، نرخ تقاضا و تعداد شهرهای مورد نظر با انواع شبکه‌های هوایی پرداختند. آن‌ها مدل‌هایی برای هزینه‌های مسافران و هزینه‌های خط هوایی ارائه دادند و اثر فاصله بین شهرها، نرخ تقاضا و تعداد شهرهای مورد نظر را در بهینه بودن شبکه بررسی کردند. آن‌ها هم‌چنین فرمولی برای

فرودگاه، زمانبندی بهینه جداول پرواز، ارزیابی و مطالعه عوامل موثر بر سطح سرویس و رضایت مسافران، برنامه‌ریزی و مدیریت انسانی و منابع فرودگاهی اشاره نمود. در این مسائل هر شرکت هواپیمایی تعداد مشخصی هواپیما و خدمه در اختیار دارد هم‌چنین فرودگاه‌ها نیز دارای منابع محدودی چون گیت، باند و ... هستند که برنامه‌ریزی و زمانبندی و تخصیص پروازها باید با توجه به این منابع و محدودیت‌ها صورت گیرد. علاوه بر محدودیت‌های مربوط به منابع، محدودیت‌هایی نیز بر اساس قوانین حاکم بر فرودگاه و حمل و نقل ایجاد می‌شوند، مانند زمان‌های استراحت هواپیما و خدمه پس از پرواز، حداکثر زمان مجاز پرواز خدمه در ماه، حداکثر تعداد پروازهای هر هواپیما در یک روز و ... هر یک از این محدودیت‌ها و قوانین در تخصیص و زمانبندی پروازها موثرند. در این مطالعه یک مدل ریاضی برای زمانبندی پروازهای خروجی از یک فرودگاه در یک شبانه روز به همراه تخصیص ناوگان و تخصیص گیت ارائه شده است. پارامترهای دخیل در این مسأله به صورت فرضی

می‌شوند و مسأله به صورت یک مدل عدد صحیح (MIP) مدلسازی و با روش دقیق به کمک نرم افزار GAMS حل می‌شود. از جمله اهداف در این مسأله می‌توان به کمینه کردن ترافیک پرواز اشاره نمود که بالطبع باعث افزایش کارایی و سطح رضایتمندی مسافران می‌شود. نوآوری در این مقاله علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی منحصر به فرد شامل در نظر گرفتن اهداف جدید در مدلسازی و حل همزمان تخصیص ناوگان، تخصیص گیت و زمانبندی پرواز می‌باشد. در ادامه تحقیقات صورت گرفته در حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی و زمانبندی پرواز ارائه گشته است.

بدست آوردن تواتر بهینه ارائه کردند. [Bolender and Slater, 2000] مسأله زمانبندی باند را در یک فرودگاه بین‌المللی بررسی کرده‌اند. مسأله مورد بررسی آن‌ها شامل انتخاب باند برای هر هواپیما، تعیین ترتیبی که هواپیماها در آن از توقفگاه اجازه ورود به تاکسی‌وی را دریافت می‌کنند و سپس ایجاد توالی پرواز با جایگذاری هواپیماهای قرار گرفته در دو صف موجود در ابتدای باند است. آزمایشات انجام شده توسط آن‌ها نشان داده است که توالی‌های گوناگونی که ترتیب ورود به تاکسی‌وی را مشخص می‌کنند، وقفه‌های زمانی متفاوتی را در صف باند بوجود می‌آورند. [Taherkhani, 1999] پژوهشی در زمینه جستجوی جواب برای مساعدت در تصمیم‌گیری‌های مربوط به کنترل باند ارائه داده است. در این پایان‌نامه مسأله توالی پرواز در حالت کلی و مسأله توالی باند پرواز به طور خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از پژوهش ارائه الگوریتم برای یک سیستم پشتیبانی تصمیم می‌باشد که در فعالیت تصمیم‌گیری برای کنترل باند همیاری نماید.

[Lieder, Briskorn and Stolletz, 2015] یک الگوریتم جدید معرفی نموده‌اند که قادر به ایجاد برنامه‌های فرود بهینه روی چندین باند مستقل با پنجره‌های زمانی محدود می‌باشد. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که مسائل با تعداد تا ۱۰۰ هواپیما می‌توانند به صورت بهینه در عرض چند ثانیه حل شوند.

۲-۲- برنامه‌ریزی مجدد پرواز بعد از بوجود آمدن اختلال

یکی دیگر از مسائل در حوزه برنامه‌ریزی خطوط هوایی برنامه‌ریزی مجدد بعد از به وجود آمدن اشکالات و حوادث

غیرقابل پیش‌بینی است که موجب اختلال در برنامه اولیه می‌شود. یکی از اولین پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه، توسط [Teodorovic and Guberinic, 1984] در کشور یوگسلاوی انجام گرفته است. در این تحقیق تنها حالت خاصی از اختلال در نظر گرفته شده است که در آن یک یا چند هواپیما به علت نقص فنی از ناوگان خارج شده و خطوط هوایی مجبور شوند بقیه پروازها را با همان تعداد هواپیمای باقیمانده انجام دهند. هدف از این پژوهش، کم کردن میزان کل تأخیر وارد بر مسافران در کل شبکه هوایی بوده است. پیشنهاد نویسندگان به منظور حل مدل روش شاخه و کران است.

[Teodorovic and Stojkovic, 1990] مدلی با اهداف پیشینه کردن تعداد پروازها و کمینه کردن میزان تأخیر مسافران ارائه کرده‌اند که در آن حذف، تغییر و تأخیر در انجام پرواز به منظور ارائه راه‌حل‌های ممکن برای حل مسئله برنامه‌ریزی دوباره پرواز در نظر گرفته شده است. برای حل مدل یک الگوریتم فرایابنده بر پایه برنامه‌ریزی پویا پیشنهاد شده است. در پژوهشی دیگر از همین نویسندگان [۱۹۹۵] روش حل کاملتری برای مسئله برنامه‌ریزی دوباره پرواز ارائه گردیده است که در آن محدودیت‌های تعمیر و نگهداری و خدمه نیز در نظر گرفته شده است. در این پژوهش هیچ فرمولبندی ریاضی برای این مسئله ارائه نشده و از طریق الفبایی و به صورت ترتیبی بدین صورت حل گردیده است که در آن ابتدا، بعد از ایجاد یک برنامه جدید پروازی، برنامه‌ای جدید برای خدمه ارائه شده است و سپس شرط امکان‌پذیری آن، از نقطه نظر محدودیت تعمیر و نگهداری چک گردیده است. [Klincewicz and Rosenwein, 1995] با کمک مدل جریان شبکه به امکان‌سنجی تغییرات در برنامه‌ریزی اولیه و تخصیص مجدد پروازی داده

شده پرداختند. راه‌حلی‌هایی که در این مدل در نظر گرفته شده است شامل اضافه نمودن پرواز، حذف پرواز و یا تغییر در نوع هواپیمای تخصیص داده شده به هر پرواز بود. اطلاعات ورودی مورد نیاز برای الگوریتم حل در اینجا نیز شامل برنامه پروازی اولیه، تخصیص ناوگان و همچنین انواع روش‌های رفع اختلال نظیر: تأخیر، حذف پرواز و ... است. در این پژوهش محدودیت‌های تعمیر و نگهداری و خدمه در نظر گرفته نشده است.

[Andersson and Varbrand, 2004] برای تخصیص دوباره پرواز، یک مدل جریان چندکالایی با حداکثر منافع همراه با محدودیت‌های جانبی ارائه نموده‌اند که در آن حذف پرواز، تأخیر در انجام پرواز و نیز تغییر هواپیما در نظر گرفته شده است. اختلال‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش نیز شامل خرابی و نقص فنی هواپیما و تأخیر در انجام پرواز است.

[Zhang et.al., 2016]، مسئله یکپارچه بازاریابی خدمات خطوط هوایی را مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن مسائل بازاریابی برنامه‌ریزی مسافر و هواپیما به صورت همزمان با هدف کاهش هزینه‌های بازاریابی هواپیما و عملیاتی، هزینه تأخیر برنامه سفر مسافران و هزینه لغو برنامه سفر مسافران مورد توجه است. چهارچوب حل پیشنهادی آن‌ها شامل سه مرحله است که در مرحله اول برنامه‌ریزی پرواز و چرخش هواپیما بازاریابی می‌شوند، سپس مسائل زمان‌بندی مجدد پرواز و بازاریابی برنامه مسافران در دو مرحله بعدی به صورت تکرار شونده حل می‌شوند.

۲-۳- انواع توابع هدف و محدودیت‌ها در مسائل

برنامه‌ریزی پرواز

مسائل برنامه‌ریزی پرواز را همچنین می‌توان براساس انواع اهداف و محدودیت‌ها مورد بررسی قرار داد. [Gürkan et.al, 2016] برای تأکید بر روابط عمیق میان مسائل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خطوط هوایی و برای کاهش تأثیر تأخیرات غیرمنتظره، به ادغام مسائل طراحی زمان‌بندی، تخصیص هواپیما و مسیریابی هواپیما در یک افق برنامه‌ریزی روزانه در حالی که سطح خدمات مسافران از طریق محدودیت‌های احتمالی تضمین می‌شود، پرداختند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی را به علت عبارات غیر خطی مصرف سوخت و هزینه انتشار CO₂ در تابع هدف که توسط فرمول‌بندی مخروطی درجه دوم به کار رفته است، پیشنهاد دادند. آن‌ها همچنین دو روش ابتکاری برای حل مسائل با سایز بزرگ‌تر پیشنهاد دادند. در نهایت نتایج محاسباتی با استفاده از داده‌های واقعی که از شرکت حمل و نقل هوایی آمریکا برای نشان دادن قابلیت و سودبخشی استفاده از روش‌های حل پیشنهادی ارائه شده است.

[Díaz-Ramírez et.al, 2014] مقاله‌ای ارائه کردند که در آن رویکردی برای حل مسائل مسیریابی تعمیر و نگهداری هواپیما (AMRP) و برنامه‌ریزی خدمه (CSP) با روش‌های متوالی و یکپارچه برای خطوط هوایی با یک ناوگان و یک پایگاه تعمیرات و نگهداری و خدمه پیشنهاد شده است. مسائل ابتدا با یک روش متوالی سنتی حل شده‌اند. AMRP در راستای حداکثرسازی درآمد ضمن برآورده کردن اندازه ناوگان فرموله شده است. این مسأله طوری حل شد که برنامه پرواز نهایی نیز تعیین گردید. CSP توسط یک روش ابتکاری برای رسیدن به اولین جواب شدنی کارا حل شد و با یک الگوریتم برچسب زنی برای حل مسئله قیمت‌گذاری که از طریق تکنیک ایجاد

ستون به وجود می‌آید، تطبیق داده شد. در آخر یک مدل ترکیبی فرموله و حل شد. هر دو روش روی برنامه‌های پرواز واقعی سه خط هوایی مهم آمریکای لاتین تست شدند. جواب‌ها منسجم و مستقل از پارامترهای محاسباتی بودند و در زمان‌های محاسباتی کوتاهی در یک کامپیوتر استاندارد به دست آمدند (برای مثال ۱ ساعت برای ۵۲۲ پرواز). جواب‌های یکپارچه بهبودهای کوچکی را نسبت به جواب‌های متوالی داشتند. با این حال این صرفه‌جویی‌ها باید با اندازه ناوگان و پیچیدگی برنامه پروازی پیشنهادی توسط خط هوایی به شدت افزایش یابند.

[Jungai and Hongjun, 2012] مدلی را بر اساس الگوریتم شبیه سازی تبرید برای بهینه سازی تأخیر پروازهای ورودی به منظور کاهش ترافیک هوایی شدید پروازهای متأخر معرفی کردند. تابع هدف مدل کاهش هزینه تأخیر می‌باشد. همچنین داده‌هایی از یک فرودگاه در چین به منظور ارزیابی مدل استفاده شده است.

[Cadarsó and Marín, 2013] مسئله برنامه‌ریزی خطوط هوایی را مورد نظر قرار داده‌اند و یک رویکرد یکپارچه استوار را که طراحی برنامه‌زمانی، تخصیص هواپیما و استفاده مسافر را بهینه می‌کند، به منظور کاهش هزینه‌ها و ایجاد ناسازگاری‌های کمتر بین تصمیمات توسعه داده‌اند.

[Samà et.al, 2013] مسئله زمان واقعی زمانبندی هواپیما در یک ناحیه کنترل ترمینال (TCA) را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله هواپیماها در زمان اختلالات هوایی و باند فرودگاه به منظور به حداقل رساندن گسترش تأخیر دوباره زمانبندی می‌شوند. آن‌ها به مقایسه الگوریتم شاخه و کران (BB) با ورود اول، خدمتدهی اول (FCFS) که از آن به عنوان جانشین رفتار مسئولین اعزام استفاده کرده‌اند، پرداخته‌اند. نتایج نشان داده‌اند

که جواب‌های حاصل از BB از کیفیت بهتری نسبت به جواب‌های حاصل از روش FCFS برخوردارند. BB برنامه شدنی را محاسبه می‌کند که تأخیر هواپیما و زمان سفر را بهتر به حداقل می‌رساند. عملکرد BB همچنین کمتر تحت تأثیر تغییرات تصادفی زمان‌های ورودی قرار می‌گیرد.

[Bea et.al, 2010] در یک مسأله مسیریابی هواپیما، یک مسیر یا توالی هواپیما را برای هر هواپیما ایجاد کرده‌اند به طوری که هر هواپیما را تنها یکبار با کمترین هزینه و برآورد نیازمندی‌های تعمیرات و نگهداری پوشش دهد و نهایتاً در مسأله بهینه سازی زمانبندی یا جفت سازی خدمه، مجموعه‌ای از تناوب یا جفت‌های خدمه با کمترین هزینه ایجاد شده است به گونه‌ای که به هر پرواز خدمه‌ای مجرب تخصیص داده شود و قوانین کار و توافقنامه‌های جمعی ارضا شوند. این تحقیق سه مدل مختلف را فرموله و تجزیه و تحلیل کرده است، که هر کدام ترکیب خاصی از مسائل برنامه‌ریزی عملیات مربوط به شرکت‌های هواپیمایی را مورد بررسی قرار می‌دهند. مدل جامع چهارمی نیز برای تحقیقات آینده پیشنهاد شده است.

[Yan et.al, 2007] یک مدل برنامه ریزی پرواز کوتاه مدت با سهام بازار متغیر را به منظور کمک به خطوط هوایی تابوان برای مسیرهای هوایی و زمانبندی پرواز بهتر در بازارهای رقابتی امروز توسعه داده‌اند. مدل به صورت یک برنامه عدد صحیح مختلط غیر خطی با هدف کمینه‌کردن هزینه سیستم فرموله شده است. آنها یک روش ابتکاری را برای حل مدل به صورت موثر توسعه داده‌اند. نتایج آزمون، که به طور عمده با استفاده از داده‌های حاصل از عملیات بزرگ شرکت هواپیمایی تابوان انجام شده است، عملکرد خوب مدل و الگوریتم را نشان می‌دهد. [Sölveling and Clarke, 2014]، یک روش حل

براساس الگوریتم تصادفی شاخه و کران برای یافتن جواب بهینه یا نزدیک به بهینه برای مسئله تصادفی برنامه‌ریزی باند فرودگاه معرفی کرده‌اند. هدف از این مسئله برنامه‌ریزی یافتن یک توالی از عملیات هواپیما روی یک یا چند باند می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی قادر به حل مثال‌های با ۱۴ هواپیما در کمتر از ۱ دقیقه محاسباتی می‌باشد.

[Marinelli et.al, 2015] یک روش بر اساس بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل (BCO) برای یافتن یک تخصیص بهینه گیت پرواز برای یک زمانبندی معلوم پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی شامل یک تجزیه و تحلیل چندمعیاره با دو هدف اصلی حداقل‌سازی کل مسافت پیاده‌روی مسافران و استفاده از گیت از راه دور می‌باشد.

نتایج مقایسه با برنامه فرودگاه میلان- مالپینسا اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. [Samà et.al, 2016] به ارایه بهینه‌سازی زمان واقعی عملیات پرواز و فرود هواپیما در یک منطقه کنترل ترافیک هوایی در شرایط ازدیاد ترافیک پرداختند. در این مقاله مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای بررسی رابطه میان شاخص‌های عملکرد مختلف سود واقعی با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیت با دقت مدل‌سازی بالا انجام گرفته است. آزمایش‌هایی برای دو فرودگاه بزرگ ایتالیایی با شبیه‌سازی مجموعه‌های مختلف اختلالات پرواز و فرود تصادفی هواپیما انجام گرفته است.

۳- تعریف مدل ریاضی

در این بخش به شرح مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل ریاضی می‌پردازیم:

۳-۱- مفروضات مدل برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت پرواز

مفروضات مدل مورد نظر به شرح زیر می‌باشند:

- مدت زمان توقف هواپیما مشخص است.

- تعداد هواپیماهای قابل تخصیص به پروازهای خروجی نوع و ظرفیت آن‌ها مشخص است.

- افق زمانی در این مسئله یک شبانه روز در نظر گرفته می‌شود.

- مجموعه مسیرهای پروازی (جفت مبدأ و مقصدها) معلوم است.

- تعداد شرکت‌های هواپیمایی معلوم است.

- فرض می‌شود یک هاب موجود است و همه پروازها از آنجا شروع و به آن بازمی‌گردند.

- فرض می‌شود همه گیت‌ها و باندها قابل تخصیص به همه پروازها و هواپیماها می‌باشند.

- هر هواپیما در یک روز حداکثر قادر به انجام دو پرواز است.

- حداقل فاصله زمانی میان پروازهای مشترک هر لگ مشخص است، برای مثال دو پرواز تهران- مشهد نباید بلافاصله پشت سرهم صورت گیرند و لازم است حداقل زمان مشخصی از پرواز قبلی به مشهد گذشته باشد.

- هر پرواز به مدت یک ساعت، باند و گیتی را که از آن پرواز صورت می‌گیرد اشغال می‌نماید.

۳-۲- نماد گذاری

۳-۲-۱- اندیس ها

N	مجموعه شماره‌های پروازهای خروجی در یک شبانه روز	G	مجموعه گیت‌های فرودگاه
n, n'	اندیس شماره پرواز	g	اندیس گیت
A	مجموعه ایرلاین‌ها	K	مجموعه بازه‌های زمانی
a	اندیس ایرلاین	k, k'	اندیس بازه
V	مجموعه هواپیماها	L	مجموعه leg‌های پرواز
v	اندیس هواپیما	l	اندیس leg پرواز
V_a	مجموعه هواپیماهای ایرلاین a		
V_n	مجموعه هواپیماهایی که می‌توانند پرواز شماره n را ببرند		
A_l	مجموعه ایرلاین‌هایی که می‌توانند پرواز l را ببرند		
N_v	مجموعه پروازهایی که توسط هواپیمایی v می‌توانند انجام شود		
N_l	مجموعه شماره پروازهای مربوط به leg .		

$Time_n$ مدت زمان پرواز شماره n

۳-۲-۲- پارامترها

$Assign_{al}$ تعداد پروازهای l که به ایرلاین a تخصیص داده شده

$\min(t)_l$ حداقل فاصله بین پروازهای l

۳-۲-۳- اسکالر

Rest زمان استراحت بین دو پرواز

Cap(b) ظرفیت باند

M یک عدد نسبتاً بزرگ

۳-۲-۴- متغیرها

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{اگر پرواز شماره } n \text{ را هواپیمای } v \text{ انجام دهد} \\
 \text{در غیر این صورت}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 1 \\
 0
 \end{array} = X_{nv}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{اگر هواپیمای } v \text{ پرواز } n \text{ را قبل از } n' \text{ انجام دهد} \\
 \text{در غیر این صورت}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 1 \\
 0
 \end{array} = Y_{nn'v}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{اگر پرواز } n \text{ در بازه } k \text{ ام انجام شود} \\ \text{در غیر این صورت} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} = Z_{nk}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{اگر پرواز شماره } n \text{ به گیت } g \text{ اختصاص یابد} \\ \text{در غیر این صورت} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} = H_{ng}$$

t_n زمان پرواز شماره n

مدل ریاضی مساله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت پرواز به شرح زیر می باشد:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{k' \in K, k' > k} \left| \sum_{n \in N} Z_{nk} - \sum_{n \in N} Z_{nk'} \right| \quad (1)$$

$$\sum_{v \in V_n} x_{nv} = 1 \quad \forall n \in N \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N_l} \sum_{v \in V_a} x_{nv} = \text{Assign}_a \quad \forall l \in L, a \in A_l \quad (3)$$

$$t_n \geq t_{n'} + 2\text{Time}_{n'} + 2 \text{Rest} - M(2 - x_{nv} - x_{n'v}) - M(1 - y_{n'nv}) \quad \forall n, n' \in N: n \neq n', v \in V_n \cap V_{n'} \quad (4)$$

$$t_{n'} \geq t_n + 2\text{Time}_n + 2 \text{Rest} - M(2 - x_{nv} - x_{n'v}) - M(y_{n'nv}) \quad \forall n, n' \in N: n \neq n', v \in V_n \cap V_{n'} \quad (5)$$

$$x_{nv} + x_{n'v} \leq 1 + y_{nn'v} + y_{n'nv} \quad \forall n, n' \in N: n < n', v \in V_n \cap V_{n'} \quad (6)$$

$$2y_{nn'v} \leq x_{nv} + x_{n'v} \quad \forall n, n' \in N: n \neq n', v \in V_n \cap V_{n'} \quad (7)$$

$$\sum_{n \in N_v} x_{nv} \leq 2 \quad \forall v \in V \quad (8)$$

$$|t_n - t_{n'}| \geq \min(t)_l \quad \forall n, n' \in N_l: n > n', l \in L \quad (9)$$

$$y_{nn'v} + y_{n'nv} \leq 1 \quad \forall n, n' \in N: n < n', v \in V_n \cap V_{n'} \quad (10)$$

$$-M(1 - Z_{nk}) + 60(k - 1)Z_{nk} \leq t_n \leq 60kZ_{nk} + M(1 - Z_{nk}) \quad \forall n \in N, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{nk} = 1 \quad \forall n \in N \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N} Z_{nk} \leq \text{cap}(b) \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{n \in N} H_{ng} \cdot Z_{nk} \leq 1 \quad \forall k \in K, g \in G \quad (14)$$

$$\sum_{g \in G} H_{ng} = 1 \quad \forall n \in N \quad (15)$$

$$t_n \leq 60 \times 24 \quad \forall n \in N \quad (16)$$

$$t_n \geq 0, \quad x_{nv}, y_{n'nv}, H_{ng}, Z_{nk} \in \{0,1\} \quad (17)$$

یکی از متغیرهای مربوط به انجام یک پرواز بعد از پرواز دیگر توسط هواپیمای مشترک ($y_{nn'v}$ یا $y_{n'nv}$) مقدار بگیرند. حتما متغیرهای مربوط به انجام هر دو پرواز توسط آن هواپیما (x_{nv} و $x_{n'v}$) نیز باید مقدار بگیرند. محدودیت (۷) به عبارتی عکس محدودیت (۶) است و تضمین می‌کند که اگر دو پرواز با هواپیمایی مشترک انجام شوند، متغیر عدم تداخل آن دو پرواز نیز حتما باید مقدار بگیرد. محدودیت (۸) این فرض را که هر هواپیمایی در یک شبانه‌روز حداکثر دو پرواز را می‌تواند انجام دهد، تضمین می‌کند. محدودیت (۹) نشان می‌دهد فاصله زمانی میان هر دو پرواز مربوط به یک لگ نباید از حداقل فاصله زمانی مشخص کمتر باشد. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که حداکثر یکی از متغیرهای ($y_{nn'v}$ یا $y_{n'nv}$) می‌توانند مقدار یک بگیرند. محدودیت (۱۱) رابطه بین دو متغیر زمان هر پرواز و بازه زمانی را نشان می‌دهد، در این مسئله ۲۴ بازه زمانی موجود است و زمان به صورت دقیقه در نظر گرفته می‌شود، برای مثال اگر پروازی در بازه یکم صورت گیرد ($Z_{n1} = 1$)، زمان آن (t_n) بین ۰ تا ۶۰ دقیقه خواهد بود که معنای زمان ۲۴ تا ۱ بامداد می‌باشد. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که هر پرواز

تابع هدف (۱) رابطه‌ای مبنی بر توزیع عادلانه پرواز در بازه‌های زمانی مختلف یک شبانه‌روز می‌باشد که با حداقل‌سازی مجموع اختلافات تعداد پروازهای صورت گرفته در بازه‌های زمانی دو به دو، این هدف صورت می‌پذیرد. محدودیت (۲) نشان می‌دهد که هر پرواز تنها به یکی از هواپیماهایی که قادر به انجام آن پرواز هستند، می‌تواند تخصیص یابد.

محدودیت (۳) تضمین می‌کند که مجموع پروازهای مربوط به هر لگ که توسط هواپیماهای هر ایرلاین انجام می‌شوند، برابر است با تعداد پروازهای l که به ایرلاین a تخصیص داده شده است. محدودیت‌های (۴) و (۵)، محدودیت‌های عدم تداخل زمانی پروازهایی هستند که توسط هواپیمای مشترک صورت می‌گیرند که به ازای هر دو پرواز یکی از آنها فعال می‌شود و دیگری حذف، همچنین نشان می‌دهد که زمان پروازی که بعد از پروازی دیگر و توسط هواپیمای مشترک با آن پرواز صورت می‌گیرد باید بزرگتر یا مساوی زمان آن پرواز بعلاوه زمان رفت و برگشت آن پرواز و زمان استراحت هواپیما در فرودگاه مقصد و مبدأ (پس از بازگشت) باشد. محدودیت (۶) رابطه بین متغیرها را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که اگر

$$t_n - t_{n'} \geq \min(t)_l \quad \forall \quad (20)$$

$$\in N_l: n > n', \quad l \in L$$

$$t_n - t_{n'} \leq -\min(t)_l \quad \forall \quad (21)$$

$$\in N_l: n > n', \quad l \in L$$

$$H_{ng} + Z_{nk} = F_{ngk} \quad \forall \xi \quad (22)$$

$$\in G, n \in N, k \in K$$

$$H_{ng} + Z_{nk} \leq F_{ngk} \quad (23)$$

$$+ 1 \quad \forall g \in G, n \in N, k \in K$$

$$2F_{ngk} \leq H_{ng} \quad (24)$$

$$+ Z_{nk} \quad \forall g \in G, n \in N, k \in K$$

در این روابط $L_{kk'}$ ، $S_{kk'}$ متغیرهایی مثبت هستند و F_{ngk} متغیری صفر و یک است.

۴- مثال‌های عددی با ابعاد مختلف و تحلیل نتایج

در جدول زیر مثال‌های عددی با تعداد پروازهای مختلف و تابع هدف به دست آمده از حل مدل با نرم‌افزار گمز آورده شده است. طبق نتایج به دست آمده با افزایش تعداد پرواز از ۸ پرواز تا ۲۵ پرواز، میزان تابع هدف کاهش یافته و از مقدار ۱۲۸ به ۲۳ رسیده است. با توجه به تابع هدف مسئله که حداقل سازی اختلاف تعداد پروازها در بازه‌های زمانی مختلف یک شبانه روز است و تعداد بازه‌ها که ۲۴ بازه می‌باشد، بنظر می‌رسد علت این امر این باشد که تا زمانی که تعداد پروازها از تعداد بازه‌ها یعنی ۲۴ کمتر است این اختلاف نسبتاً بالا است و با افزایش تعداد پرواز بیشتر می‌شود و پس از آن با افزایش پرواز از ۲۵ به

تنها به یک بازه تعلق می‌گیرد. محدودیت (۱۳) محدودیت ظرفیت باند فرودگاه هست و تضمین می‌کند که مجموع تعداد پروازهایی که در هر بازه زمانی انجام می‌شوند نباید از ظرفیت باند فرودگاه بیشتر باشند. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که در هر بازه زمانی و از هر گیت، حداکثر یک پرواز می‌تواند صورت گیرد. محدودیت (۱۵) نشان می‌دهد که هر پروازی تنها به یک گیت تخصیص می‌یابد. محدودیت (۱۶) حداکثر زمان هر پرواز را نشان می‌دهد که محدود به ۲۴ بازه زمانی ۶۰ دقیقه‌ای می‌باشد. محدودیت (۱۷) عدد مثبت بودن متغیر زمان و باینری بودن سایر متغیرها را نشان می‌دهد.

۳-۳- خطی‌سازی مدل

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مدل مذکور تابع هدف (۱) و همچنین محدودیت‌های (۹) و (۱۴) غیر خطی هستند و می‌بایست برای حل مدل به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته، آن را خطی کنیم. که در ادامه محدودیت (۱۸) برای خطی‌سازی تابع هدف به مدل اضافه می‌شود و تابع هدف به صورت رابطه (۱۹) درمی‌آید، محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) برای خطی‌سازی محدودیت (۹) و محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) برای خطی‌سازی محدودیت (۱۴) به مدل اضافه می‌شوند. برای خطی‌سازی این محدودیت حاصلضرب دو متغیر مطابق رابطه (۲۲) برابر با متغیری جدید در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{n \in N} Z_{nk} - \sum_{n \in N} Z_{nk'} \quad (18)$$

$$= S_{kk'} - L_{kk'} \quad \forall k, k' \in K, k < k'$$

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{k' \in K \\ k' > k}} S_{kk'} + L_{kk'} \quad (19)$$

۲۸ مجدداً اختلاف تعداد پرواز در بازه‌ها زیاد می‌شود و به حال داده‌ها و نتایج مثال ۱ را با جزئیات بیشتری شرح می‌دهیم. همین منوال ادامه پیدا می‌کند. جداول ورودی مربوط به مثال ۱ به شرح زیر می‌باشند.

جدول ۱. داده‌ها و نتایج حاصل از مدل زمان‌بندی کوتاه‌مدت پرواز

مثال	تعداد پرواز	تعداد ایرلاین	تعداد هواپیما	تعداد لگ پرواز (مقصد)	تابع هدف
۱	۸	۳	۱۰	۷	۱۲۸
۲	۱۸	۵	۱۲	۸	۱۰۸
۳	۲۰	۶	۱۳	۹	۸۰
۴	۲۳	۶	۱۳	۱۰	۲۳
۵	۲۵	۷	۱۴	۱۱	۲۳
۶	۲۸	۷	۱۵	۱۱	۸۰
۷	۳۰	۷	۱۷	۱۲	۱۰۸
۸	۳۳	۷	۱۷	۱۲	۱۳۵
۹	۳۵	۷	۱۸	۱۲	۱۴۳
۱۰	۳۸	۷	۲۱	۱۳	۱۴۰
۱۱	۴۵	۷	۲۶	۱۴	۶۳
۱۲	۵۰	۸	۲۹	۱۵	۴۴

جدول ۲. هواپیماهای هر ایرلاین

شماره هواپیما										شماره شرکت هواپیمایی
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
	۱		۱			۱			۱	۱
				۱	۱		۱	۱		۲
۱		۱								۳

جدول ۳. هواپیماهای قابل تخصیص به هر پرواز

شماره هواپیما										شماره پرواز
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱	۱		۱	۱		۱		۱	۱	۱
	۱	۱					۱			۲
۱	۱		۱	۱		۱		۱	۱	۳
		۱			۱				۱	۴
			۱			۱		۱		۵
۱				۱	۱					۶
	۱		۱				۱			۷
		۱			۱		۱			۸

جدول ۴. لگ‌های مربوط به هر شماره پرواز

شماره پرواز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مشهد	۱		۱					
شیراز		۱						
یزد					۱			
ساری								۱
اصفهان							۱	
بوشهر					۱			
اهواز				۱				

جدول ۵. لگ‌های قابل تخصیص به هر شرکت هواپیمایی

شماره ایرلاین	۱	۲	۳
مشهد	۱	۱	۱
شیراز	۱	۱	۱
یزد		۱	۱
ساری		۱	۱
اصفهان	۱	۱	
بوشهر	۱	۱	
اهواز	۱	۱	۱

جدول ۶. تعداد پروازهای تخصیصی هر لگ به هر ایرلاین (مربوط به پارامتر assignal)

شماره شرکت هواپیمایی	مشهد	شیراز	یزد	ساری	اصفهان	بوشهر	اهواز
۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰
۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۳	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰

جدول ۷. زمان هر پرواز - دقیقه

شماره پرواز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
زمان هر پرواز (time _n)	۱۲۰	۱۸۰	۱۲۰	۲۴۰	۳۰۰	۲۱۰	۹۰	۶۰

جدول ۸. جدول حداقل فاصله زمانی بین پروازهای هر لگ (مربوط به پارامتر $(\min(t))$ - دقیقه

لگ (مقصد) پرواز	مشهد	شیراز	یزد	ساری	اصفهان	بوشهر	اهواز
حداقل فاصله زمانی میان هر لگ	۱۰۲	۲۰۴	۳۰۶	۱۵۳	۱۰۲	۴۰۸	۴۰۸

همچنین زمان استراحت (rest) هواپیما بعد از هر پرواز ۳۰ دقیقه و تعداد ۷ باند و ۷ گیت پرواز در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در تمام مثال‌ها ۲۴ بازه زمانی یک ساعته مدنظر بوده است.

متغیرهای خروجی این مثال نیز توسط جداول زیر ارائه می‌شود:

جدول ۹. متغیر تخصیص هواپیما به پرواز X_{ij}

شماره پرواز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱										✓
۲									✓	
۳	✓									
۴					✓					
۵				✓						
۶										✓
۷									✓	
۸			✓							

همانطور که ملاحظه می‌شود دو پرواز ۱ و ۶، همچنین دو پرواز ۲ و ۷ با هواپیماهای مشترک انجام می‌شوند و متغیر باینری $y_{2,7,9}=1$ و $y_{1,6,10}=1$ مربوط به هواپیماهای مشترک مقدار یک می‌گیرد.

جدول ۱۰. جدول زمان‌بندی

شماره پرواز	بازه	زمان پرواز به دقیقه	زمان پرواز تبدیل شده به ساعت
۱	1	0	24:00
۲	17	960	16:00
۳	14	780	13:00
۴	7	360	6:00
۵	5	240	4:00
۶	10	540	9:00
۷	24	1380	23:00
۸	4	180	3:00

۷- مراجع

-Andersson T., and P. Varbrand. (2004), "The Flight perturbation problem". *Transportation planning and Technology* 227(2), pp.91-117.

-Bea, K-H., et al., (2010), "Integrated Airline Operations: Schedule Design, Fleet Assignment, Aircraft Routing, and Crew Scheduling". For the degree of Doctor of Philosophy in Industrial and Systems Engineering.

-Bolender M.A. and Slater. G.L., (2000), Analysis and optimization of departure sequences. In proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and control conference and exhibit, Denver, co, August, pp. 1672-1683.

-Cadarso, L., Marín, Á., (2013), "Robust passenger oriented timetable and fleet assignment integration in airline planning". *Journal of Air Transport Management* 26, pp. 44-49.

-Díaz-Ramírez J., Ignacio Huertas J. and Trigos F., (2014), "Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 75, pp. 68-78.

-Gürkan H., Gürel S. and Aktürk M.S., (2016), "An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleet and routing with cruise speed control". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 68, pp. 38-57.

-Jaillet, P., Song, G., and Yu Gang., (1996), "Airline Network Design and Hub Location

پنج پرواز ۱، ۲، ۳، ۵ و ۶ به گیت ۱ و پروازهای ۴، ۷ و ۸ به ترتیب به گیت‌های ۶، ۵ و ۴ تخصیص داده شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل ریاضی ارائه شد که اختلاف تعداد پرواز در بازه‌های مختلف زمانی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود توزیع تراکم پرواز به صورت متعادل باشد. ویژگی‌های اصلی مقاله در نظر گرفتن اهداف جدید در برنامه‌ریزی پرواز و همچنین در نظر گرفتن سه مسئله تخصیص ناوگان، تخصیص گیت و زمان‌بندی پرواز به صورت همزمان در یک مدل می‌باشد. به طور کلی هدف اصلی این تحقیق بهبود برنامه‌ریزی‌های پرواز و در پی آن کاهش ترافیک پرواز است که بالطبع باعث کاهش تأخیرات و هزینه‌ها و افزایش رضایت مسافران می‌گردد. زمینه‌های قابل بررسی در تحقیقات آتی عبارتند از: واقع‌بینانه‌تر کردن و توسعه مدل با اعمال تغییرات لازم و مدنظر قرار دادن سایر محدودیت‌ها و اهداف، بهره‌گیری از سایر روش‌های حل و مقایسه نتایج با روش حاضر. توسعه بازه برنامه‌ریزی و ابعاد مسئله و در صورت ناتوانی حل توسط GAMS، استفاده از الگوریتم‌های فرابتنکاری که متناسب با ماهیت مدل باشند، بررسی مسأله مورد نظر با فرض احتمالی و یا فازی بودن پارامترهای مدل و نزدیک‌تر به واقعیت، انجام مطالعات موردی در فرودگاه‌های مختلف با مدنظر قرار دادن شرایط آن‌ها و ایجاد تغییرات مناسب در مدل و ارائه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مناسب.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Mix Integer Programming
- 2- Aircraft Maintenance Routing Problem
- 3- Crew Scheduling Problem
- 4 - Bee Colony Optimization
- 5-Origin-Destination Pairs
- 6-Hub

considerations. Omega, In Press, Corrected Proof.

-Sölveling G., Clarke J.P., (2014), "Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound methods". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 45, August 2014, pp. 119–137.

-Teodorovic. Dusan B., (1983), "Flight Frequency Determination." Transportation Engineering, Vol. 109, No.5, September.

-Teodorovic D. and Guberinic S., (1984), "Optimal Dispatching Strategy on an Airline Network after a schedule perturbation", European Journal of operational Research, 15, pp.178-182.

-Teodorovic Dusan, Milica Kalic, and Goran Pavcovic, (1994), "The potential for using Fuzzy set Theory In Airline Network Design", Transportation Research (B), Vol. 28B, No.2, pp. 103-121.

-Teodorovic D. and Stojkovic G., (1990), Model for operation Daily Airline Scheduling, Transportation Planning and Technology, 14, pp. 273-285.

-Teodorovic D. and Stojkovic G., (1995), Model to Reduce Airline Schedule Disturbances. Journal of transportation Engineering, pp. 324-331.

-Yan, S., Tang, C-H., Lee, M-C., (2007), "A flight scheduling model for Taiwan airlines under market competitions. Omega, The

Problems", Location Science, Vol.4, pp. 195-211.

-Jungai, T. & Hongjun, X., (2012), "Optimizing Arrival Flight Delay Scheduling Based on Simulated Annealing Algorithm". Physics Procedia 33, pp. 348 – 353.

-Klincewicz J. and Rosenwein M., (1995), "The Airline Exception Scheduling Problem", Transportation Science, 29, pp. 4-16.

-Laderer Phillip J. and Nambimadom Ramakrishnam S. (1998), "Airline Network Design", Operation Research, Vol. 46, No.6, November-December.

-Lieder A., Briskorn D., Stolletz R., (2015), "A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes". European Journal of Operational Research, Volume 243, Issue 1, 16 May 2015, pp. 61–69.

-Marinelli M., Dell'Orco M., Sassanelli D., (2015), "A Metaheuristic Approach to Solve the Flight Gate Assignment Problem". Transportation Research Procedia, Volume 5, pp. 211-220.

-Samà, M., D'Ariano, A. & Pacciarelli, D., (2013). Rolling Horizon Approach for Aircraft Scheduling in the Terminal Control Area of Busy Airports. Procedia - Social and Behavioral Sciences 80, pp. 531 – 552.

-Samà, M., D'Ariano, A., D'Ariano, P. & Pacciarelli, D., (2016), scheduling models for optimal aircraft traffic control at busy airports: Tardiness, priorities, equity and violations

- اصغریور، م.، (۱۳۸۵)، "تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.

- طاهرخانی، ح.، (۱۳۸۸). "تعیین توالی پرواز همراه با جابجایی‌های منطقه نگهداری در فرودگاه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی شریف.

International Journal of Management Science, 35, pp. 61-74.

-Zhang D., Yu C., Desai J., Lau H., (2016), "A math-heuristic algorithm for the integrated air service recovery". Transportation Research Part B: Methodological, Volume 84, February 2016, pp. 211-236.

