مدل ریاضی تخصیص ناوگان، همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر، نگهداری و رمپینگ هواپیما

علیرضا رشیدی کمیجان*[۱]، مهسا شبانکاره[۲]

۱. دانشیار مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۳/۶، تاریخ تصویب ۹۶/۰۶/۲۴)

چکیده

مسئلهٔ مسیریابی و برنامه‌ریزی تعمیرات هواپیما از جمله مسائل مهم و پیچیده سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی است؛ از این‌رو باید عواملی که بر افزایش تأخیرها و هزینه‌ها تأثیرگذار است و موجب نارضایتی مسافران می‌شود شناسایی شوند. ازجمله این عوامل می‌توان به زمان مورد نیاز برای انجام عملیات رمپینگ هواپیما و انجام عملیات بازرسی و تعمیر و نگهداری آن اشاره کرد که مستقیماً بر روی تأخیرات پروازی و هزینه‌ها اثرگذار است، این پژوهش به ارائهٔ دو مدل جدید برای برنامه‌ریزی تعمیرات هواپیما براساس ساعات پرواز (نه روزهای پرواز) و زمان‌بندی فعالیت‌های رمپینگ هواپیما می‌پردازد؛ به‌طوری‌که هزینه‌ها و تأخیرات را مینیمم می‌کند. دو مدل ریاضی ارائه‌شده در نرم‌افزار گمز حل شده و برای هرکدام تحلیل حساسیت انجام گرفته است که نتایج این تحلیل نشان می‌دهد در مدل تعمیر و نگهداری، افزایش تعداد هواپیماها سبب کاهش هزینه‌ها و در مدل رمپینگ افزایش ماشین‌آلات سبب کاهش جزئی تأخیرات می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کارایی مناسب مدل‌ها در کاهش هزینهٔ تعمیر و نگهداری و تأخیرات پروازی است.

واژه‌های کلیدی: تعمیر و نگهداری، رمپینگ، مسیریابی هواپیما، مدل‌سازی ریاضی

مقدمه

بشر در عصر ارتباطات و تعاملات گسترده و عمیق زندگی و کار می‌کند که به‌منظور تنظیم بسیاری از روابط خود با دیگران نیاز به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فعالیت‌ها دارد، اما پیش‌بینی، تأثیر و کنترل بسیاری از عوامل محیطی خارج از اختیارات اوست؛ بنابراین، همیشه این انتظار وجود دارد که تغییراتی در برنامه‌ریزی‌ها رخ دهد. در این میان بررسی و تحلیل تغییرات در برنامه‌ریزی صنعت هواپیمایی از نظر پیچیدگی و حساسیت مرتبط با دانش فنی پیشرفته، تنوع تخصص و امکانات و تجهیزات بسیار و غیره اهمیت بسیار زیادی دارد.

از جمله مهم‌ترین مسائلی که برنامه‌ریزان و مدیران هر شرکت هواپیمایی با آن مواجهند، مسئلهٔ برنامه‌ریزی پرواز هواپیماهاست. در این مسئله فرض می‌شود که هر شرکت هواپیمایی تعداد مشخصی هواپیما در اختیار دارد که باید با استفاده از آن‌ها پروازهای زمان‌بندی‌شدهٔ خود را با درنظرگرفتن محدودیت‌های متنوع انجام دهد. یکی از محدودیت‌های این مسئله، محدودیت تعمیر و نگهداری هواپیماهاست. به این صورت که هر هواپیما پس از تعداد ساعات معینی پرواز باید برای انواع بازرسی‌ها و تعمیر یا تعویض قطعات اعزام شود. با توجه به محدودیت ظرفیت ناوگان و آشیانه‌های تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی مناسب در این مورد، ممکن است تأثیر چشمگیری بر کارایی خطوط هواپیمایی داشته باشد. یکی دیگر از محدودیت‌های این مسئله، محدودیت‌های مربوط به عملیات رمپینگ است که باید در فاصلهٔ نشستن تا برخاستن هواپیما روی آن انجام گیرد. در طول این زمان، هواپیما برای پرواز بعدی آماده می‌شود و برخی عملیات مانند سوخت‌گیری، بارگیری و تخلیهٔ چمدان‌ها، تمیزکردن کابین، بارگیری و تخلیهٔ مسافران و وسایل پذیرایی بر روی هواپیما انجام می‌شود که این عملیات را عملیات رمپ می‌نامند؛ بنابراین هریک از این عملیات ممکن است یکی از عوامل تأثیرگذار در تأخیرات پروازی باشد. با توجه به این موضوع مدیران و مسئولان درصدد یافتن راه‌حلی برای به‌حداقل‌رساندن این تأخیرات و کاهش هزینه‌ها هستند، به این منظور دو مدل پیشنهادی برای مسئلهٔ تعمیر و نگهداری هواپیما، همچنین خدمات رمپ در این تحقیق ارائه شده است.

مرور ادبیات

ادبیات مربوط به مسئلهٔ تخصیص ناوگان همراه با فعالیت‌های تعمیر و نگهداری و رمپینگ هواپیما را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: تخصیص ناوگان، تعمیر و نگهداری هواپیماها و رمپینگ هواپیما.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۲۱۷۶۴۴۴۰۹۱، فکس:۰۲۱۷۶۴۴۵۹۹۴ Email: Rashidi@azad.ac.ir

تخصیص ناوگان

اولین مطالعات در زمینهٔ تخصیص ناوگان را آبارا انجام داد. او دربارهٔ مسئلهٔ تخصیص ناوگان در سایزهای عملی و کاربردی بحث کرد و برای فرموله‌کردن مدل خود شبکه‌ای ارتباطی تنظیم کرد که دو جزء اصلی آن گره‌ها و کمان‌ها بودند. این شبکه ارتباطی ۴ نوع گره دارد: گره‌های برخاست، گره‌های نشست، گره‌های مبدأ و مقصد. این شبکه بدون اینکه به ایستگاهی مربوط باشد زمان‌های آغاز و پایان تخصیص ناوگان را ارائه می‌دهد [۱]. دیسولنیرز و همکاران مدل‌های یکپارچه مسیریابی و تخصیص ناوگان را با توالی پروازهای ازپیش مشخص‌شده و تخصیص این توالی به انواع ناوگان ارائه دادند. آن‌ها از الگوریتم شاخه و قیمت برای حل آن استفاده کردند[۲]. یان و تسنگ فرایند زمان‌بندی را با تخصیص ناوگان ترکیب نمودند. در مدل آن‌ها تمام طول پروازها به‌عنوان طول‌های بهینه درنظر گرفته شدند که در صورت نیاز در برنامه انتخاب می‌شوند [۳].

شرالی و ژو رویکرد احتمالی دومرحله‌ای را که ابتدا تخصیص ناوگان، سپس در فرایند بعدی تخصیص مجدد ناوگان که با تقاضای احتمالی سروکار دارد انجام می‌شود معرفی کردند. برای کاهش اثرات تقاضای غیرقطعی، مرحلهٔ اول بر روی ساختن سطح خانواده و تخصیص ناوگان به هر پرواز تمرکز می‌کند؛ از این‌رو انعطاف‌پذیری بیشتری برای فرایند بعدی تخصیص ناوگان مجدد فراهم می‌شود سپس در مرحلهٔ دوم با بهبود پیش‌بینی تقاضا یک سطح ناوگان تخصیص داده‌شده برای هر پرواز با خانوادهٔ یکسان براساس تقاضای مربوط ساخته می‌شود [۴]. شرالی و همکاران ترکیب مسئلهٔ تخصیص ناوگان را با زمان‌بندی پرواز درنظر گرفتند. آن‌ها بیان کردند که بهبود موقعیت‌های ارتباط پروازها سبب افزایش درآمد شرکت‌های هواپیمایی می‌شود؛ بنابراین، از روش حل تجزیه بندرز برای حل مدل استفاده کردند [۵]. تران وان هوای مسئلهٔ تخصیص ناوگان شرکت‌های هواپیمایی را بررسی کرد. [۶]. وانگ و همکاران رویکرد برنامه‌ریزی ناوگان جدید برای شرکت‌های هواپیمایی که در شبکه‌هایhub and spoke فعالیت می‌کنند ارائه دادند [۷]. شائو و همکاران نیز مدل و رویکردی از تجزیهٔ جدید برای مسئلهٔ یکپارچهٔ تخصیص ناوگان، مسیریابی هواپیما و جفت‌کردن خدمه ارائه کردند [۸]. جمیلی مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئلهٔ یکپارچهٔ زمان‌بندی و مسیریابی هواپیما را با درنظرگرفتن مسئلهٔ تخصیص ناوگان ارائه داد [۹]. گورکان و همکاران رویکردی یکپارچه برای زمان‌بندی شرکت‌های هواپیمایی، تخصیص هواپیما و مسیریابی همراه با کروز کنترل ارائه دادند [۱۰].

تعمیر و نگهداری هواپیما

گوپالان و تالوری اشاره کردند که تعمیر و نگهداری شامل چهار نوع بررسی و عبارت است از: بررسی‌های A، B، C و D. که هرکدام از آن‌ها دامنه، تناوب و مدت متفاوتی دارند [۱۱]. کومار، کروکرو کنزویچ به مطالعهٔ مفهوم تعمیر و نگهداری برای موتورهای هواپیما و به دسته‌بندی‌کردن تعمیر و نگهداری هواپیما به سه نوع تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تعمیر و نگهداری اصلاحی و تعمیر و نگهداری پیش‌گویانه پرداختند [۱۲]. کوهن و بارنهارت تصمیمات مسیریابی تعمیر و نگهداری را با مسئله زمان‌بندی خدمه با استفاده از یک رویکرد زنجیره‌ای ترکیب کردند. مدل مسیریابی هواپیما به‌عنوان بخشی از این فرمول، درحالی‌که به زمان‌بندی تعمیر و نگهداری توجه می‌شد کاربرد داشت. آن‌ها از روش شاخه و قیمت برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی خدمه استفاده کردند و این روش را برای مسائل مسیریابی و تعمیر و نگهداری نیز توسعه دادند [۱۳]. مرسیر و سومیس مدلی یکپارچه از مسیریابی هواپیما، زمان‌بندی خدمه و زمان‌های پرواز ارائه دادند. آن‌ها فرض کردند مسئلهٔ تخصیص ناوگان به‌عنوان یک پیش‌نیاز حل شده است؛ بنابراین نوع هواپیماهایی که به هر پرواز تخصیص داده می‌شود مشخص است. آن‌ها از تجزیهٔ بندرز و ترکیب آن با سایر روش‌ها برای حل این مدل استفاده کردند [۱۴].

آلمگرن و همکاران مسئلهٔ زمان‌بندی تعمیر و نگهداری را برای موتورهای هواپیما درنظر گرفتند. آن‌ها مسئله‌ای تک‌هدفه را با هدف حداقل‌کردن کل هزینهٔ تعمیر و نگهداری توصیف کردند [۱۵]. ژاکوپز و همکاران زمان‌بندی هواپیما را به دو بخش مجزا تقسیم کردند: مرحلهٔ مسیریابی تعمیر و نگهداری از هواپیما و مرحلهٔ تخصیص شماره به آن [۱۶]. باسدر و همکاران مسئلهٔ مسیریابی تعمیر و نگهداری هواپیما را با زمان باقی‌مانده درنظر گرفتند. هدف آن‌ها توسعهٔ پاسخگویی سریع برای فراهم‌کردن مسیرهای تعمیر و نگهداری شدنی بود [۱۷]. اوله و همکاران رویکردی برای بهینه‌کردن هزینه‌های تأثیرگذار بر توقف هواپیما برای تعمیر مجموعه آیتم‌های قابل تعمیر ارائه دادند [۱۸]. بن احمد و همکاران به بررسی مسئلهٔ مسیریابی هواپیما و مسئلهٔ زمان‌بندی مجدد با توجه به مجموعه‌ای از پروازها که باید هواپیماها طی کنند همراه با برنامهٔ تجربی پرداختند. آن‌ها یک راهبرد حل دومرحله‌ای ارائه دادند [۱۹].

جدول ۱. مرور ادبیات تعمیر و نگهداری

نام	سال	توضیحات
گوپالان و تالوری	۱۹۹۸	بررسی چک‌های تعمیر و نگهداری
کومار و همکاران	۱۹۹۹	بررسی تعمیر و نگهداری موتورهای هواپیما
کوهن و بارنهارت	۲۰۰۳	ترکیب تعمیر و نگهداری با زمان‌بندی خدمه
مرسیر و سومیس	۲۰۰۷	ترکیب تعمیر و نگهداری با زمان‌بندی خدمه و زمان‌های پرواز
آلمگرن و همکاران	۲۰۱۲	بررسی تعمیر و نگهداری موتورهای هواپیما
تیموتی و همکاران	۲۰۱۲	زمان‌بندی هواپیما
باسدر و همکاران	۲۰۱۴	مسیریابی تعمیر و نگهداری با توجه به زمان باقی‌مانده
بن احمد و همکاران	۲۰۱۶	مسئلهٔ مسیریابی هواپیما همراه با زمان‌بندی مجدد
اوله و همکاران	۲۰۱۷	بهینه‌سازی هزینه‌های مؤثر بر تعمیر و نگهداری
در این مقاله	۲۰۱۷	بررسی تعمیر و نگهداری با توجه به زمان پرواز

رمپینگ هواپیما

فیقان و همکاران بررسی دقیقی از چارچوب قوانین اتحادیه‌های اروپایی را بر روی خدمات فرودگاه و سیستم مخارج آن انجام دادند. آن‌ها تأثیر خدمات و نحوهٔ انجام آن را بر روی مخارج فرودگاه مطالعه کردند. در این مقاله به رفع مشکلات اقتصادی و کاربردی فرودگاه پرداختند و با توجه به مبهم‌بودن اطلاعات و وجود موانع، تک‌تک عوامل از جمله خدمات را بررسی کردند، همچنین با درنظرگرفتن این عوامل و اطلاعات به‌دست‌آمده از این بررسی‌ها، به برنامه‌ای جامع برای کاهش هزینه در فرودگاه دست یافتند [۲۰].

پرینتس و لومبارد مطالعه‌ای موردی بر روی مقررات شرکت‌های تجاری دولتی در فرودگاه‌های آفریقای جنوبی و خدمات ناوبری و ترافیک هوایی با استفاده از استانداردهای خدمات انجام دادند و در آن به معیار اقتصاد و استاندارد اشاره کردند. زمان انجام خدمات را نیز عاملی مهم و تأثیرگذار بیان کردند. گفتنی است هدف آن‌ها به‌دست‌آوردن ضوابطی برای انجام خدمات و نحوهٔ انجام آن‌ها بوده است [۲۱].

هولت و همکاران مدلی را درنظر گرفتند که به چهار روش اصلی در بهره‌وری سرمایه و خدمات وابسته به آن توجه می‌کند. یکی از این عوامل، که تأثیر بسزایی در بهبود شرایط فرودگاه داشت، بهبود عملکرد تجهیزات در دسترس بوده است، همچنین آن‌ها بیان کردند که بهبود در خدمت‌رسانی و عملکرد تجهیزات سبب بهبود روند رشد فرودگاه و افزایش بهره‌وری، کارایی و سودآوری می‌شود [۲۲].

یوان و همکاران نقش فرودگاه‌ها و خدمات را بر روی دستاوردهای اقتصادی حمل‌ونقل هوایی تعیین کردند. در این مقاله مدلی برای تأثیر روش‌های خدماتی فرودگاه و کارایی آن بر فرودگاه به‌دست آمد. در مدل آن‌ها روش‌های خدماتی طی دوره‌ای ارزیابی شد و ترافیک هوایی نیز عاملی مهم در آن به‌شمار آمد. نتیجهٔ کار آن‌ها به افزایش سطح کیفی خدمات و بهره‌وری منجر شد [۲۳].

سانز دی ویسنته از مدل شبیه‌سازی CAST برای تجزیه‌وتحلیل سناریوهای مختلف در خدمات زمینی استفاده کرد [۲۴]. چن و کوا شرایط خدمات‌رسانی هوایی و تأثیر آن را بر عملکرد مهمانداران ارزیابی، و به این موضوع اشاره کردند که شرایط خدمت‌رسانی علاوه‌بر اینکه بر روی رشد فرودگاه و رضایت مسافران تأثیر بسزایی دارد، بر عملکرد کارکنان فرودگاه از جمله مهمان‌داران نیز تأثیرگذار است. آن‌ها به بررسی پیچیدگی خدمات و تأثیرات همه‌جانبهٔ آن پرداختند و رابطهٔ بین شرایط خدمات‌رسانی و میزان اثربخشی خدمات در فرودگاه را بیان کردند [۲۵].

لی به تعیین مخارج بخش خدماتی فرودگاه و تعیین تقریبی هزینه‌های خطوط هوایی و تخمین هزینهٔ خدمات پرداخت. در این راستا ضریب همبستگی داده‌ها را به‌کار برد و ارتباط بین تأثیر فعالیت‌ها را در بخش خدمات هوایی و هزینه‌های ناشی از آن بیان کرد که نتایج حاصل از آن نه‌تنها به هزینهٔ فعالیت‌های خدماتی و مدیریت آن بلکه به بازده آن نیز توجه، و رابطهٔ میان کیفیت خدمات و هزینهٔ فرودگاه‌ها را بیان می‌کند [۲۶].

سلینکا و همکاران دربارهٔ عملکرد وابسته به زمان کامیون‌های حمل‌کننده در ترمینال‌های باربری فرودگاه‌ها مطالعه کردند. در این مقاله زمان حمل کامیون‌ها و نحوهٔ باربری آن‌ها عاملی مهم در کارایی فرودگاه بود. آن‌ها راه‌حلی برای عملکرد وابسته به زمان کامیون‌های

حمل‌کننده ارائه دادند و مقایسه‌ای عددی با شبیه‌سازی و قابلیت به‌کارگیری آن در شرایط واقعی پیشنهاد کردند [۲۷]. استادیک و همکاران نیز به بررسی رویکردی سامانمند برای مدیریت ریسک ایمنی پرداختند [۲۸].

در این پژوهش با توجه به شکاف پژوهشی موجود، ابتدا مدل مسیریابی هواپیما همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری توسعه داده، سپس مدل رمپینگ هواپیما ارائه خواهد شود. در تمام پژوهش‌های پیشین، مدل مسیریابی هواپیما و زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیراتی براساس تعداد روزهای پرواز ارائه شده است. درواقع، مسیریابی هواپیما به‌گونه‌ای انجام می‌شود که پیش از تمام‌شدن سومین روز پرواز، هواپیما مجدد تعمیر شود. در این پژوهش، برنامه‌ریزی تعمیرات هواپیما براساس تعداد ساعات پرواز فرموله می‌شود که در مقایسه با مدل‌های پیشین بسیار دقیق‌تر، و فرموله کردن آن نیز به‌مراتب پیچیده‌تر است؛ زیرا مدل از حالت صفر و یک خالص به مخلوط تبدیل می‌شود، همچنین مدل دوم که به زمان‌بندی فعالیت‌های رمپینگ مربوط است تاکنون ارائه نشده است.

جدول ۲. مرور ادبیات رمپینگ هواپیما

نام	سال	توضیحات
فیقان و همکاران	۱۹۹۸	بررسی خدمات فرودگاه و سیستم مخارج آن
پرینتس و لومبارد	۲۰۰۰	بررسی مقررات شرکت‌های تجاری در فرودگاه‌ها
هولت و همکاران	۲۰۰۶	بررسی بهره‌وری سرمایه و خدمات وابسته در فرودگاه‌ها
یوان و همکاران	۲۰۰۹	بررسی نقش فرودگاه‌ها و خدمات بر اقتصاد حمل‌ونقل هوایی
سانزدی ویسنته	۲۰۱۰	تجزیه‌وتحلیل سناریوهای مختلف در خدمات زمینی
چن و کوا	۲۰۱۴	بررسی تأثیر خدمات‌رسانی بر عملکرد مهمانداران
لی	۲۰۱۴	بررسی هزینه‌های خطوط هوایی
سلینکا و همکاران	۲۰۱۴	مطالعهٔ زمان حمل کامیون‌ها و نحوهٔ باربری
استادیک و همکاران	۲۰۱۷	بررسی یک رویکرد سامانمند برای مدیریت ریسک خدمات زمینی
در این مقاله	۲۰۱۷	زمان‌بندی فعالیت‌های رمپینگ

بیان مسئله

از آنجا که هنگام عملیات و اجرای برنامه‌ها، شرکت‌های هواپیمایی همواره با وقوع اتفاقات کنترل‌نشدنی و پیش‌بینی‌نشده مانند نامساعدبودن وضعیت هوا، بروز مشکلات فنی و... مواجه هستند که این امر برنامهٔ اولیه را منحرف می‌کند، یکی از بزرگ‌ترین موقعیت‌ها برای شرکت‌های هوایی و سایر شرکت‌های وابسته به فرودگاه بهبود کارایی و انعطاف‌پذیری خدمات رمپ برای عمل‌کردن با هزینه‌های کمتر و کاهش تأخیرهای زمان‌بندی پروازهاست، همچنین فعالیت‌های تعمیر و نگهداری به‌عنوان ستون فقرات یک شرکت هواپیمایی موفق هستند؛ به‌گونه‌ای که در صنعت هوایی نقش تعمیر و نگهداری فراهم‌کردن امنیت، پرواز مناسب و به‌موقع هواپیما در هر روز است؛ از این‌رو ایجاد زمان‌بندی بهینه در انجام خدمات رمپ و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری ضروری به‌نظر می‌رسد.

در بخش بعدی دو مدل ریاضی برای این مسئله مطرح می‌شود.

مدل‌سازی

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

مدل تخصیص ناوگان همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری

مفروضات مدل به شرح زیر است:

- ✓ تمام پارامترهای موجود قطعی فرض می‌شوند؛
- ✓ هر هواپیما بعد از تعداد ساعات معینی باید تعمیر و نگهداری شود؛
- ✓ هواپیماهایی با ویژگی‌های مختلف وجود دارد؛
- ✓ افق برنامه‌ریزی روزانه است؛
- ✓ تقاضا ثابت و قطعی است.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

C: مجموعه شهرها؛

c, d : اندیس شهر؛

K : مجموعه هواپیماها (ناوگان)؛

k : اندیس هواپیما؛

F: مجموعه پروازها به‌طوری‌که $(c,d) \in F$؛

F': مجموعه پروازهای برنامه‌ریزی نشده؛

N : مجموعه دفعات پرواز؛

n, n' :اندیس مرتبهٔ پرواز؛

o_k: شهر مبدأ پروازی هواپیمای k در ابتدای دورهٔ برنامه‌ریزی.

پارامترها

$Cost_{ck}$: هزینهٔ بازرسی تعمیر و نگهداری هواپیما k در شهر c؛

$Cost'_{cd}$: هزینهٔ سفر (سوخت) از شهر c به شهر d؛

Dur_{cd}: مدت‌زمان پرواز هواپیما از شهر c به شهر d؛

P_c: اگر در شهر c امکان تعمیر و نگهداری هواپیما وجود داشته باشد امتیاز ۱ و در غیر این صورت صفر است.

H'_k: حد ساعت مجاز برای تعمیر و نگهداری هواپیما k.

اسکالر

M: یک عدد بزرگ.

متغیرهای تصمیم

H_{ck}: مقدار زمان پرواز طی‌شده از آخرین تعمیر و نگهداری با هواپیمای k در شهر c.

X_{cdkn}: اگر هواپیمای k از شهر c به شهر d در مرتبه n پرواز کند، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

Y_{ck}: اگر هواپیمای k عملیات تعمیر و نگهداری خود را در شهر c انجام دهد، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

مدل ریاضی مسئلهٔ تخصیص ناوگان همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری هواپیما به شرح زیر است:

$$Min \sum_{c\in C}\sum_{k\in K} Cost_{ck}Y_{ck} + \sum_{c\in C}\sum_{\substack{d\in C:\\(c,d)\in F'}}\sum_{k\in K}\sum_{n\in N} Cost'_{cd}\ X_{cdkn} + \sum_{c\in C}\sum_{\substack{d\in C:\\(c,d)\in F'}}\sum_{k\in K}\sum_{n\in N} Cost'_{cd}(X_{cdkn}-1) \quad (۱)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{n} X_{cdkn} = 1\ \forall\ (c,d) \in F \quad (۲)$$

$$\sum_{\substack{c\in C:\\(c,d)\in F}} X_{cdkn} \geq \sum_{\substack{c\in C:\\(d,c)\in F}} X_{dckn+1}\ \forall\ d \in C, k \in K, n \in B \quad (۳)$$

$$\sum_{\substack{d\in C:\\(c,d)\in F}}\sum_{n} X_{cdkn} \leq 1\ \forall\ c \in C, k \in K \quad (۴)$$

$$\sum_{\substack{c\in C:\\(c,d)\in F}}\sum_{n} X_{cdkn} \leq 1\ \forall d \in C, k \in K \quad (۵)$$

$$Y_{ck} \leq \sum_{\substack{d\in C:\\(d,c)\in F}}\sum_{n} X_{dckn}\ \forall\ c \in C, k \in K \quad (۶)$$

$$H_{ck} + Dur_{cd} - M(1-\sum_{n} X_{cdkn}) - MY_{ck} \leq H_{dk}\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c \neq o_k \quad (۷)$$

$$H_{dk} \leq H_{ck} + Dur_{cd} + M(1-\sum_{n} X_{cdkn}) + MY_{ck}\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c \neq o_k \quad (۸)$$

$$Dur_{cd} - M(1-\sum_{n} X_{cdkn}) - M(1-Y_{ck}) \leq H_{dk}\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c \neq o_k \quad (۹)$$

$$H_{dk} \leq Dur_{cd} + M(1-\sum_{n} X_{cdkn}) + M(1-Y_{ck})\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c \neq o_k \quad (۱۰)$$

$$Dur_{cd} - M(1-X_{cdkn}) \leq H_{dk}\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c = o_k, n = 1 \quad (۱۱)$$

$$H_{dk} \leq Dur_{cd} + M(1-X_{cdkn})\ \forall\ k \in K, \forall (c,d) \in F, c = o_k, n = 1 \quad (۱۲)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{ck} \leq MP_c\ \forall\ c \in C \quad (۱۳)$$

$$H_{ck} \leq H'_k\ \forall\ c \in C, k \in K \quad (۱۴)$$

$$\sum_{\substack{c\in C:\\(c,d)\in F}}\sum_{\substack{d\in C:\\(d,c)\in F}} X_{cdkn} \leq 1\ \forall\ k \in K, n \in B \quad (۱۵)$$

$$\sum_{\substack{d\in C:\\(c,d)\in F}} X_{cdkn} = \sum_{\substack{d\in C:\\(c,d)\in F}}\sum_{n'>1} X_{dckn'}\ \forall\ k \in K, c = o_k, n = 1 \quad (۱۶)$$

$$\sum_{\substack{d\in C:\\ d\neq c}} X_{cdkn} = 1 \;\forall\, c \in C, k \in O_k, n = 1 \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{c\in C}\sum_{d\in C} X_{cdkn} \le 1 \qquad \forall\, k \in K, n \in N \qquad (۱۸)$$

$$H_{ck} > 0\; X_{cdkn}, Y_{ck} \in \{0,1\} \qquad (۱۹)$$

تابع هدف درنظر گرفته‌شده (رابطهٔ ۱) مقدار هزینه‌های تعمیر و نگهداری هواپیماها و هزینهٔ پروازهای برنامه‌ریزی‌نشده و بدون بلیت را کمینه می‌کند. محدودیت ۲ بر این نکته تأکید می‌کند که ممکن است هر پرواز فقط با یک هواپیما انجام شود. در محدودیت ۳ بیان می‌شود که اگر هواپیما در مرتبهٔ n+1 پرواز خود را از شهری شروع کند، حتماً باید در مرتبهٔ قبل به آن شهر رسیده باشد. محدودیت ۴ تضمین می‌کند هر هواپیما از هر شهری فقط یک‌بار و به یک شهر می‌تواند برود. در محدودیت ۵ نیز بیان می‌شود که هر هواپیما به هر شهری فقط یک‌بار و از یک شهر می‌تواند برود. در محدودیت ۶ مشخص می‌شود که یک هواپیما در صورت نیاز به تعمیر و نگهداری به شهری که مراکز تعمیر و نگهداری دارد، هدایت می‌شود. مجموعه محدودیت‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ محدودیت‌های مربوط به تعمیر و نگهداری هستند؛ به‌گونه‌ای که میزان ساعات پروازی طی‌شده با هواپیمای k از آخرین دورهٔ تعمیر و نگهداری را محاسبه می‌کنند. مجموعه محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ نیز محدودیت‌های اصلی تعمیر و نگهداری هستند با این تفاوت که میزان ساعات پروازی طی‌شده با هواپیمای k را در حالتی که فرودگاه مبدأ به‌عنوان شهر مبدأ درنظر گرفته شده است محاسبه می‌کند. در محدودیت ۱۳ درمی‌یابیم که اگر هواپیما به تعمیر و نگهداری نیاز داشته باشد، این امکان در شهرهایی که امکانات لازم برای تعمیر و نگهداری دارند موجود است. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند که یک هواپیما تا زمان تعمیر و نگهداری خود در یک زمان قانونی پرواز کند. در محدودیت ۱۵ بیان می‌شود که هر هواپیما در هر مرتبه تنها می‌تواند از یک شهر به شهر دیگر پرواز کند. محدودیت ۱۶ محدودیت تعادل پرواز را در مقایسه با فرودگاه مبدأ برقرار می‌کند. در محدودیت ۱۷ می‌بینیم که هواپیما اولین حرکت خود را از شهر مبدأ خود انجام می‌دهد و درنهایت محدودیت ۱۸ بیان می‌کند که هر هواپیما در هر مرتبه پرواز حداکثر می‌تواند یک مسیر را طی کند.

مدل رمپینگ هواپیما

مفروضات مدل به شرح زیر است:

- ✓ تمام پارامترهای موجود قطعی فرض می‌شوند؛
- ✓ هواپیماهایی با ویژگی‌های مختلف وجود دارد؛
- ✓ افق برنامه‌ریزی روزانه است؛
- ✓ تقاضا ثابت و قطعی است؛
- ✓ هر هواپیما پیش از پرواز تنها به‌یک‌بار انجام خدمات رمپ نیاز دارد؛
- ✓ اولویت انجام عملیات رمپ به برنامهٔ پروازی وابسته است؛ یعنی هر پروازی که زمان آن نزدیک‌تر است باید عملیات رمپ روی آن زودتر انجام شود.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

P: مجموعه عملیات رمپ؛

p: اندیس عملیات؛

K: مجموعه ماشین‌آلات استفاده برای هریک از عملیات؛

k: اندیس ماشین؛

F: مجموعه پروازها؛

f, f' :اندیس پرواز؛

A_{pk}: مجموع ماشین‌آلات k که در عملیات p استفاده می‌شود.

پارامترها

T_{pkf}: مدت‌زمان لازم برای عملیات p با ماشین k در پرواز f؛

ST_f: زمان شروع پرواز f.

اسکالر

M: یک عدد بزرگ.

متغیرها

Y_{pkf}: اگر عملیات p با ماشین k در پرواز f انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$X_{pkff'}$: اگر عملیات p با ماشین k در پرواز f قبل از پرواز f′ انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

C_{pkf}: زمان پایان انجام خدمات p با ماشین k در پرواز f؛

MT_f : ماکزیمم زمان تأخیر پرواز.

مدل ریاضی مسئلهٔ رمپینگ هواپیما به شرح زیر است:

$$Min \sum_f \left\{ Max \left\{ \max_p \sum_{k\in A_{pk}} C_{pkf} - (ST_f - 45), 0 \right\} \right\} \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{k\in A_{pk}} Y_{pkf} = 1 \;\forall\, p \in P, f \in F \qquad (۲۱)$$

$$C_{pkf} \le MY_{pkf} \ \forall\ p \in P, f \in F, k\ \in A_{pk} \qquad (۲۲)$$

$$X_{pkff'} + X_{pkf'f} \le 1$$

$$\forall\ p \in P\ , f, f' \in F\ , f < f', k\quad \in\ A_{\mathrm{pk}} \qquad (۲۳)$$

$$2X_{pkff'} \le Y_{pkf} + Y_{pkf'}$$

$$\forall\ p \in P, k \in A_{pk},\ \ f, f' \in F\ , f \ne f' \qquad (۲۴)$$

$$Y_{pkf} + Y_{pkf'} \le X_{pkff'} + X_{pkf'f} + 1$$

$$\forall\ p \in P\ , k \in A_{pk}\ , f, f' \in F\ , f <\ f' \qquad (۲۵)$$

$$C_{pkf} \ge\ C_{pkf'} +\ T_{pkf} - MX_{pkf'f} - \left(2 - Y_{pkf} - Y_{pkf'}\right)M$$
$$\forall\ p \in P\ , k \in A_{\mathrm{pk}}\ , f, f' \in F\ , f <\ f' \qquad (۲۶)$$

$$C_{pkf'} \ge C_{pkf} +\ T_{pkf'} - MX_{pkf'f} - \left(2 - Y_{pkf} - Y_{pkf'}\right)M$$
$$\forall\ p \in P\ , k \in A_{\mathrm{pk}}\ , f, f' \in F\ , f <\ f' \qquad (۲۷)$$

$$C_{pkf} \ge T_{pkf}Y_{pkf} \qquad \forall\ f \in F\ \ , p \in P\ , k \in A_{\mathrm{pk}} \qquad (۲۸)$$

$$C_{pkf}, MT_f > 0\ , \qquad X_{pkff'}\ , Y_{pkf} \in \{0,1\} \qquad (۲۹)$$

محدودیت ۲۰ تابع هدف مدل را نشان می‌دهد که تابعی غیرخطی است و بیان می‌کند اگر اختلاف زمان بین ماکزیمم زمان پایان خدمات از بین زمان‌های خدمات انجام‌شده و زمان شروع پرواز از صفر بیشتر باشد، پرواز مورد نظر تأخیر دارد. در محدودیت ۲۱ می‌بینیم که هر عملیات بر روی هر هواپیما تنها با یکی از ماشین‌هایی که می‌توانند آن عملیات را انجام دهند صورت می‌پذیرد. محدودیت ۲۲ نشان می‌دهد اگر عملیات p با ماشین k در پرواز f انجام شود، به‌طوری‌که متغیر Y_{pkf} مقدار یک بگیرد، حتماً این عملیات به پایان می‌رسد. با توجه به محدودیت ۲۳ می‌بینیم که تنها یکی از دو متغیر $X_{pkff'}$ و $X_{pkf'f}$ می‌توانند مقدار یک بگیرند. محدودیت ۲۴ نشان می‌دهد اگر عملیات p با ماشین k در پرواز f قبل از پرواز f' انجام شود در این صورت هر دو متغیر Y_{pkf} و $Y_{pkf'}$ باید مقدار یک بگیرند. با توجه به محدودیت ۲۵، اگر یکی از متغیرهای $X_{pkff'}$ و $X_{pkf'f}$ مقدار یک بگیرند هر دو متغیر Y_{pkf} و $Y_{pkf'}$ باید مقدار یک بگیرند، اگر هر دو متغیر $X_{pkff'}$ و $X_{pkf'f}$ مقدار صفر بگیرند متغیرهای Y_{pkf} و $Y_{pkf'}$ می‌توانند صفر یا تنها یکی از آن‌ها مقدار یک بگیرد. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ محدودیت‌های تداخل‌ناپذیر هستند، به‌گونه‌ای که عملیات باید روی یک پرواز، سپس روی پرواز دیگر انجام شود. محدودیت ۲۸ نشان می‌دهد اگر عملیات p با ماشین k در پرواز f انجام شود، باید زمان پایان این عملیات از زمان انجام آن بزرگ‌تر یا مساوی آن باشد.

مثال عددی

برای نشان‌دادن توانایی‌ها و اثبات مدل‌های پیشنهادی در مسائل تخصیص ناوگان همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری و رمپینگ هواپیما در این بخش مثال عددی با داده‌های اولیهٔ تصادفی بررسی می‌شود.

تشریح مثال عددی

مثال عددی مسئلهٔ تخصیص ناوگان همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری

فرض کنید سیزده هواپیما در دسترس است که باید به شانزده شهر پرواز کند؛ به‌طوری‌که هریک از آن‌ها ممکن است ۷ مرتبه پرواز داشته باشد. P_c بیانگر وجود امکانات تعمیر و نگهداری در آن شهر است که در این مثال این امکان در شهرهای تهران، کرمان و شیراز وجود دارد. همچنین پارامتر H'_{k} که همان حد ساعت پرواز مجاز برای هواپیماها را بیان می‌کند، برابر ۳ ساعت پرواز درنظر گرفته شده است که هواپیماها بعد از ۳ ساعت پرواز موظف هستند برای بازرسی و تعمیر و نگهداری به زمین بنشینند. مبدأ هواپیماهای شمارهٔ ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳ تهران و هواپیماهای ۲ و ۴ کیش و هواپیماهای ۸ و ۱۱ در مشهد تعریف شده است.

اطلاعات مربوط به هزینه‌ها و مدت پرواز در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

نتایج حاصل از مثال عددی

تمام محاسبات با استفاده از نرم‌افزار گمز انجام شده که نتایج حاصل از آن در جدول‌های ۵ و۶ نشان داده شده است.

جدول ۳. هزینه‌های تعمیر و نگهداری (هزارتومان)

c/k	تهران	کرمان	شیراز
۱	۴۰۰	۷۰۰	۵۰۰
۲	۴۵۰	۶۵۰	۶۵۰
۳	۵۰۰	۶۵۰	۷۰۰
۴	۶۰۰	۷۰۰	۶۵۰
۵	۵۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۶	۴۰۰	۵۰۰	۷۵۰
۷	۳۵۰	۵۰۰	۴۵۰
۸	۵۵۰	۶۵۰	۷۰۰
۹	۴۰۰	۶۰۰	۵۵۰
۱۰	۵۰۰	۵۵۰	۵۰۰
۱۱	۳۵۰	۶۵۰	۵۵۰
۱۲	۳۰۰	۵۵۰	۴۵۰
۱۳	۳۰۰	۵۰۰	۵۰۰

جدول ۴. مدت پرواز بین دو شهر

c/d	تهران	کیش	مشهد	ساری	شیراز	اهواز	ایلام	تبریز	کرمان	اصفهان	زنجان	بیرجند	شاهرود	سبز وار	بم	ایرانشهر
تهران	۰	۱,۴۵	۱,۳۰	۱	۱,۲۰	۱,۱۰	۱,۱۵	۱,۱۰	۱,۴۰	۱,۱۰	۰,۳۰	۱,۳۰	۱,۱۰	۱,۱۵	۲	۲
کیش		۰	۲	۲	۱	۱,۳۰	۱,۳۰	۲,۲۰	۱,۱۵	۱,۲۳	۱,۳۰	۲	۲	۲	۱,۳۰	۱,۲۶
مشهد			۰	۱,۳۰	۱,۴۵	۲	۲	۲	۱,۲۵	۱,۳۰	۱,۵۰	۱	۱	۰,۴۰	۲	۲
ساری				۰	۱,۳۰	۱,۴۵	۲	۱,۴۵	۱,۴۵	۱,۳۰	۱	۱,۳۰	۱,۱۵	۱,۱۵	۲	۲
شیراز					۰	۱,۱۵	۱,۴۰	۱,۵۰	۱	۱	۱,۱۵	۱,۴۵	۱,۴۵	۱,۴۵	۱,۱۵	۱,۳۰
اهواز						۰	۱	۱,۳۰	۱	۱,۲۰	۱,۱۵	۲	۱,۴۵	۲	۱,۴۵	۲
ایلام							۰	۱,۳۰	۱,۱۵	۱,۱۵	۱,۱۰	۲	۱,۴۰	۲	۱,۴۵	۲
تبریز								۰	۱,۳۰	۱,۲۰	۰,۳۰	۱,۴۵	۱,۳۰	۱,۴۵	۲	۲
کرمان									۰	۱,۱۰	۱,۱۰	۲	۱,۴۵	۲	۰,۳۰	۱,۳۰
اصفهان										۰	۰,۴۰	۱,۴۵	۱,۳۰	۱,۴۵	۱,۵۰	۲
زنجان											۰	۱,۴۵	۱,۳۰	۱,۴۵	۱,۴۵	۱,۵۵
بیرجند												۰	۱,۳۰	۰,۴۰	۲	۱,۴۵
شاهرود													۰	۱,۱۵	۱,۴۵	۱,۴۵
سبزوار														۰	۲	۱,۴۵
بم															۰	۱,۳۰
ایرانشهر																۰

جدول ۵. هواپیماهای نیازمند به انجام تعمیر و نگهداری

c/k	تهران	کیش	مشهد	ساری	شیراز	اهواز	ایلام	تبریز	کرمان	اصفهان	زنجان	بیرجند	شاهرود	سبزوار	بم	ایرانشهر
۱																
۲																
۳																
۴	*								*							
۵									*							
۶																
۷																
۸	*															
۹																
۱۰																
۱۱	*															
۱۲																
۱۳									*							

جدول ۶. تخصیص هواپیماها به شهرها

n/k	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	تهران- کرمان	کرمان - تهران					
۲	کیش- تهران	تهران- کیش					
۳	تهران- ایلام	ایلام- تهران					
۴	کیش- کرمان	کرمان- تبریز	تبریز- زنجان	زنجان- ایرانشهر	ایرانشهر - تهران	تهران - مشهد	مشهد- کیش
۵	تهران- ساری	ساری - مشهد	مشهد - کرمان	کرمان - اهواز	اهواز- تهران		
۶	تهران- شاهرود	شاهرود- تهران					
۷	تهران- شیراز	شیراز- تهران					
۸	مشهد- سبزوار	سبزوار- تهران	تهران- ایرانشهر	ایرانشهر- مشهد			
۹	تهران- بیرجند	بیرجند- تهران					
۱۰	تهران- اصفهان	اصفهان- تهران					
۱۱	مشهد- ساری	ساری- تهران	تهران- بم	بم- کرمان	کرمان- کیش	کیش- مشهد	
۱۲	تهران- اهواز	اهواز- کرمان	کرمان- بم	بم- تهران			
۱۳	تهران- سبزوار	سبزوار- بیرجند	بیرجند- تبریز	تبریز- کرمان	کرمان- مشهد	مشهد- تهران	

مثال عددی مسئلهٔ رمپینگ هواپیما

فرض کنید ۵ عملیات رمپینگ موجود است که باید با ۸ ماشین بر روی هواپیما انجام شود. اگر تعداد پروازها برابر ۱۰ باشد، زمان شروع یا همان زمان صفر برابر با ساعت ۶ صبح، و بقیهٔ مقادیر به دقیقه و با توجه به این زمان نوشته شده است. از آنجا که هر هواپیما پس از اتمام عملیات رمپینگ خود زمانی طول می‌کشد تا پرواز خود را آغاز کند، زمانی برای آن درنظر گرفته شده که باید عملیات رمپینگ قبل از این زمان به پایان برسد، این زمان حدود ۴۵ دقیقه درنظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر این زمان، زمان بین اتمام عملیات رمپینگ تا سوارشدن کامل مسافران و آمادگی کامل هواپیما برای پرواز است. ادامهٔ اطلاعات مربوط در جدول‌های ۷ تا ۹ بیان شده است.

جدول ۷. تخصیص ماشین‌آلات به خدمات

p/k	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰

نتایج حاصل از مثال عددی

تمام محاسبات با استفاده از نرم‌افزار گمز انجام شده که نتایج حاصل از آن در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۸. زمان شروع پرواز

شمارهٔ پرواز (f)	زمان شروع پرواز (ST_f)
۱	۶۰
۲	۱۲۰
۳	۶۰
۴	۱۲۰
۵	۱۸۰
۶	۳۰۰
۷	۴۲۰
۸	۶۰
۹	۶۰۰
۱۰	۶۰

جدول ۹. مدت‌زمان انجام عملیات رمپینگ در هر پرواز

p.k/f	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱.۱	۱۵	۳۰	۱۵	۱۰	۲۵	۱۰	۲۰	۳۰	۱۵	۲۵
۱.۳	۱۵	۲۵	۱۵	۱۰	۳۰	۱۰	۲۵	۳۰	۱۵	۳۰
۲.۲	۲۵	۴۰	۳۰	۲۰	۳۰	۲۵	۳۵	۴۰	۳۰	۴۵
۲.۴	۲۵	۴۰	۳۰	۲۰	۳۵	۲۵	۳۵	۴۵	۳۰	۴۰
۳.۵	۱۵	۲۵	۱۰	۱۰	۲۵	۲۰	۳۵	۳۰	۲۵	۳۵
۴.۶	۲۰	۲۵	۱۵	۱۰	۲۵	۱۵	۲۰	۳۰	۱۵	۳۰
۴.۸	۲۰	۳۰	۱۵	۱۰	۲۵	۲۰	۲۰	۳۵	۱۰	۳۰
۵.۷	۱۵	۳۰	۲۰	۱۵	۲۵	۲۵	۲۵	۳۰	۱۵	۳۵

جدول ۱۰. تخصیص ماشین‌آلات به پروازها

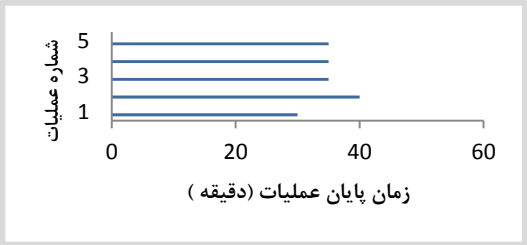
p.k/f	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱.۱			❊				❊	❊	❊	
۱.۳	❊	❊		❊	❊	❊				❊
۲.۲	❊			❊	❊	❊		❊	❊	
۲.۴		❊	❊				❊			❊
۳.۵	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
۴.۶		❊			❊	❊				❊
۴.۸	❊		❊	❊			❊	❊	❊	
۵.۷	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊

در شکل ۱ زمان پایان عملیات رمپینگ در پروازهای مختلف نشان داده می‌شود و در شکل ۲ می‌توان ماکزیمم زمان پایان عملیات رمپینگ را در هر پرواز نشان داد. حال با توجه به این نمودار و جدول زمان شروع پروازها (جدول شمارهٔ ۸) می‌توان تأخیرات پروازها را مشخص کرد؛ بنابراین شکل ۳ ماکزیمم زمان تأخیرات پروازها را نشان می‌دهد که با توجه به شکل بیشترین تأخیر در پروازهای ۸ و ۱۰ با ۲۵ دقیقه تأخیر است.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

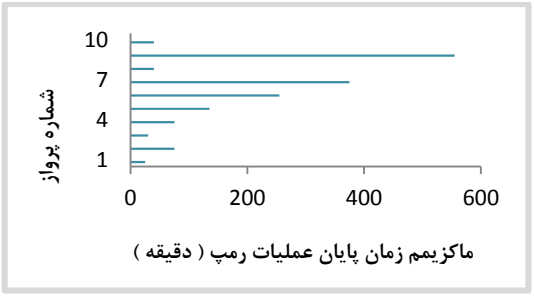
تجزیه‌وتحلیل مدل تخصیص ناوگان همراه با زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری

همان‌گونه که در شکل ۴ نمایان است با افزایش تعداد هواپیماها، تابع هدف که همان مینیمم‌سازی هزینه‌های تعمیر و نگهداری است کاهش می‌یابد و سیر نزولی دارد؛ یعنی هرچقدر تعداد هواپیماها را افزایش دهیم، از آنجا که پروازها با هواپیماهای بیشتری انجام می‌شود، هواپیماها کمتر به حد ساعت مجاز پرواز خود برای تعمیر و نگهداری می‌رسند و این امر سبب می‌شود تعداد هواپیماهای کمتری تحت عملیات تعمیر و نگهداری قرار بگیرند؛ به همین دلیل هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری هواپیماها کاهش

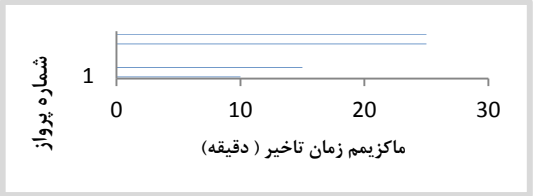


شکل ۱. زمان پایان عملیات رمپینگ

می‌یابد، درنتیجه با توجه به نمودار شکل ۴ می‌توان نشان داد بهترین تعداد هواپیما برای کاهش هزینه‌ها بین ۱۴ تا ۱۵ عدد است که بیشترین شیب کاهش را دارد.

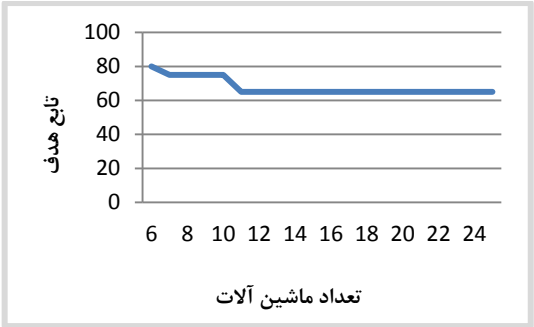


شکل ۲. ماکزیمم زمان پایان عملیات رمپینگ



شکل ۳. ماکزیمم زمان تأخیرات پروازها

شکل ۴. تجزیه‌وتحلیل مدل تخصیص ناوگان همراه با تعمیر و نگهداری



شکل ۵. تجزیه‌وتحلیل مدل رمپینگ هواپیما

تجزیه‌وتحلیل مدل رمپینگ هواپیما

همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود با افزایش تعداد ماشین‌آلات تابع هدف مربوط، ابتدا سیر نزولی سپس ثابت و بار دیگر سیر نزولی طی می‌شود و درنهایت به اثبات می‌رسد. درنتیجه می‌توان بیان کرد سرمایه‌گذاری روی ۷ ماشین از ۶

ماشین بهتر است؛ زیرا سبب کاهش تأخیرات می‌شود، اما تعداد ۷ تا ۱۰ ماشین تأثیر چندانی ندارد و بار دیگر سرمایه‌گذاری بر روی ۱۱ ماشین سبب کاهش بیشتر تابع هدف یا همان تأخیرات می‌شود، درنهایت با تعداد ماشین بیشتر از ۱۱ از آنجا که تأثیری بر روی تابع هدف ندارد سرمایه‌گذاری برای ماشین‌آلات بیشتر پیشنهاد نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو مدل ریاضی ارائه شده است که هزینه‌ها و تأخیرات پروازها را کاهش می‌دهد. از ویژگی‌های اصلی این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در مدل اول مسیریابی و زمان‌بندی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری هواپیما براساس تعداد ساعات پرواز مشخص، و این مقوله در تمامی پژوهش‌های پیشین براساس تعداد روزهای پرواز انجام می‌شود. در این مدل بهترین تخصیص هواپیماها به پروازها برای کمینه‌کردن هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینهٔ پروازهای برنامه‌ریزی نشده و بدون بلیت است همچنین در مدل دوم، زمان‌بندی فعالیت‌های رمپینگ و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت که تاکنون در مدل‌های موجود به آن پرداخته نشده است، بررسی می‌شود که درنتیجهٔ آن می‌توان کاهش تأخیرات پروازی و بهترین توازن انجام فعالیت‌های رمپینگ را با تجهیزات انجام‌شده بیان کرد. به‌طورکلی هدف اصلی این تحقیق بهبود فعالیت‌های رمپینگ و تعمیر و نگهداری هواپیماها در فرودگاه‌ها و در پی آن افزایش رضایت مسافران بوده است.

زمینه‌های پژوهش‌های آتی عبارت است از: حل مدل با استفاده از روش‌های شاخه وکران، تجزیهٔ بندرز و روش‌های ابتکاری و فراابتکاری، بسط مدل برای حالتی که تقاضا و سایر داده‌ها غیرقطعی یا احتمالی است و درنظرگرفتن افق برنامه‌ریزی به‌صورت هفتگی و ماهانه.

منابع

1. Abara. J. (1989). “Applying integer linear programming to the fleet assignment problem”, *Interfaces*, Vol. 19, No. 4, PP. 20-28.
2. Desaulniers, G. et al., (1997). “Daily aircraft routing and scheduling”, *Management Science*, Vol. 43, No. 6, PP. 841-855.
3. Yan, S. Y. and Tseng, C. H. (2002). “A passenger demand model for airline flight scheduling and fleet routing”, *Computers and Operations Research*, Vol. 29, No. 11, PP. 1559-1581.
4. Sherali, H. D. and Zhu, X. (2008). “Two-stage fleet assignment model considering stochastic passenger demands”, *Operations Research*, Vol. 56, No. 2, PP. 383- 399.
5. Sherali, H. D., Bae, K. H. and Haouari, M. (2010). “Integrated airline schedule design and fleet assignment: Polyhedral analysis and Bender’s Decomposition approach”, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 22, No. 4, PP. 500-513.
6. Tran, Van Hoai. (2013). “Airline fleet assignment”, *Faculty of Computer Science and Engineering HCMC University of Technology*, PP.1-15.
7. Wang, Y., Sun, H., Zhu, J. and Zhu, B., (2015). “Optimization model and algorithm design for airline fleet planning in a multiairline competitive environment”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 13, No. 1 , PP. 1-13.
8. Shao, S., Sherali, H. D. and Haouari, M., (2015). “A novel model and decomposition approach for the integrated airline fleet assignment, aircraft routing and crew pairing problem”, *Transportation Science*, Vol. 51, No.1, PP. 233-249.
9. Jamili, A. (2017). “A robust mathematical model and heuristic algorithms for integrated aircraft routing and scheduling with consideration of fleet assignment problem”, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 58, No. 1, PP. 21-30.
10. Gurkan, H., Gurel, S. and Akturk, M. S. (2016). “An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleeting and routing with cruise speed control”, *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, Vol. 68, No. 1, PP. 38-57.
11. Gopalan, R. and Talluri, K. T. (1998). “The aircraft maintenance routing problem”, *Operations Research*, Vol. 46, No. 2 , PP. 260-271.
12. Kumar, U. D., Crocker, J. and Knezevic, J. (1999). “Evolutionary maintenance for aircraft engines”, *Annual reliability and maintainability symposium*, PP. 62-68.
13. Cohn, A. M. and Barnhart, C. (2003). “Improving crew scheduling by incorporating key

maintenance routing decisions", *Operations Research*, Vol. 51, No. 3, PP. 387- 396.
14. Mercier, A. and Soumis, F. (2007). "An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model", *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 8, PP. 2251- 2265.
15. Almgren, T., Andreasson, N., Patriksson, M., Stromberg, A., Wojciechowski, A. and Onnheim, M., (2012). "The opportunistic replacement problem: Theoretical analyses and numerical tests", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 76, No. 3, PP. 289- 319.
16. Jacobs T. L., et al., (2012). "Airline planning and schedule development", *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol.169, No. 1, PP. 35-99.
17. Basdere, M. and Bilge, U. (2014). "Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration", *European Journal of Operational Research*, Vol. 235, No. 1, PP. 315-328.
18. Wijk, O., Andersson, P., Block, J. and Righard, T., (2017). "Phase out maintenance optimization for an aircraft fleet", *International Journal of Production Economics*, Vol. 188, No. 1, PP. 105-115.
19. Ben Ahmed, M., Zeghal Mansour, F. and Haouari, M. (2016). "A two level optimization approach for robust aircraft routing and retiming", *Computers and Industrial Engineering*, PP. 1-24.
20. Feighan, A. and Feighan, K. (1997). "Airport services and airport charging systems: A critical review of the EU common framework", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 33, No. 4, PP. 311-320.
21. Prints, V. and Lombard, P. (2000). "Regulation of commercialized stated-owned enterprises: Case study of South Africa airports and air traffic and navigation services", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 2, No. 3-4, PP.163-171.
22. Holt, D., Philips, J. and Horncostle, A. (2006). "Capital efficiency at airports and related services", *Utilities Policy*, Vol.14, No.4, PP.251-261.
23. Yuan, X., Low., J. M. W. and Tang, L. C. (2009). "Roles of the airport and logistics services on the economic outcomes of an air cargo", *International Journal of Production Economics*, Vol.127, No.2, PP.215-225.
24. Sanz de Vicente, S. (2010). "Ground handling simulation with CAST", *Hamburg University of Applied Science*, PP. 1-84.
25. Chen, Ch. and Koa, Y. (2014). "Investigating the moderation effects of service climate on personality, motivation, social support and performance among flight attendants", *Tourism Management*, Vol. 44, No. 1, PP. 58-66.
26. Li, S. (2014). "The cost allocation approach of airport service activities", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 38, No. 1, PP. 48-53.
27. Selinka, G., Franz, A. and Stollets, R. (2016). "Time dependent performance approximation of tuck handling operations at an air cargo terminal", *Computers and Operations Research*, Vol. 65, No. 3, PP. 164-173.
28. Studic, M., Majumdar, A. and Schuster, W. (2017). "A systematic modeling of ground handling services using the functional resonance analysis method", *Transportation Research, Part C*, Vol. 74, No. 4, PP. 245-260.