

# مکان‌یابی چندهدفه‌ی فرودگاه‌های هاب پرازدحام با استفاده از سیستم‌های صف

مصطفی پارسا (کارشناس ارشد)

علی شاهنده\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی صنایع و مدیریت شریف (تابستان ۱۳۹۴)  
دوری ۱ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۵۱-۳۷

شرکت‌های هواپیمایی به‌منظور بهره‌مندی از مزیت‌های مقیاس اقتصادی از شبکه‌ی هاب‌وگمان در برنامه‌ریزی پروازهای خود استفاده می‌کنند. برخی از فرودگاه‌های هاب به‌دلیل تمرکز جریان، به‌ویژه در ساعات اوج، از لحاظ ترافیک هوایی پرازدحام شده، تأخیرات پروازی آن‌ها افزایش می‌یابد. در این پژوهش هر باند فرودگاه به‌صورت سیستم صف  $M/G/1$  در نظر گرفته شده و مدل‌های فرعی سه‌گانه‌ی برای تعیین ظرفیت ورودی بهینه‌ی هواپیماها به باندهای نشست، برخاست و ترکیبی ارائه می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که روش ارائه شده تعادل بار ترافیک را بهتر برقرار کرده، موجب کاهش ازدحام در هاب‌های شلوغ و افزایش بهره‌وری در سایر هاب‌ها می‌شود. به‌منظور پرکردن شکاف‌های تحقیقاتی در حوزه‌ی مکان‌یابی هاب، توابع هدف مربوط به آسیب‌های زیست‌محیطی و انرژی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از روش محدودیت -  $\epsilon$  جواب‌های کارآ و با استفاده از روش AHP گروهی جواب مرجع انتخاب و نتایج اجرای مدل روی شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی داخلی کشور آمریکا گزارش می‌شود.

واژگان کلیدی: مسائل مکان‌یابی هاب، ازدحام، سیستم‌های صف، مدل چندهدفه، تعادل بار ترافیک.

## ۱. مقدمه

دی‌اکسید ( $CO_2$ ) و... مستقیماً یا غیرمستقیماً باعث آسیب‌های جدی بر سلامتی و بروز امراضی چون امراض تنفسی، ناراحتی‌های عصبی، قلب و عروق، و در نهایت مرگ زودرس می‌شود.<sup>[۸-۵]</sup>

صنعت حمل‌ونقل هوایی علاوه بر چالش‌های زیست‌محیطی با بحران انرژی نیز روبه‌روست. آژانس اطلاعات انرژی آمریکا (EIA) در گزارش‌های سالانه‌ی خود تحت عنوان «چشم‌انداز بین‌المللی انرژی» آورده است که ۲۰٪ انرژی جهان در بخش حمل‌ونقل مصرف می‌شود که منبع غالب آن به‌صورت سوخت مایع است.<sup>[۹]</sup> این سازمان پیش‌بینی کرده که مصرف سوخت مایع در این بخش سالیانه ۱٫۴٪ و در سال ۲۰۳۵ نسبت به سال ۲۰۰۸، معادل ۴۱٪ افزایش داشته باشد. این درحالی است که از یک سو قیمت سوخت در سال‌های اخیر روند صعودی داشته و از دیگر سو، منابع طبیعی تأمین سوخت، تجدیدناپذیر و در حال اتمام است.<sup>[۱۰]</sup>

چالش‌های مطرح شده تاکنون در مسائل مکان‌یابی هاب در نظر گرفته نشده است. از این رو در این پژوهش مدلی چندهدفه برای تعیین ساختار شبکه‌های حمل‌ونقل هوایی هاب‌وگمان با در نظر گرفتن مسئله‌ی ازدحام و معیارهای آلودگی هوا، آلودگی صوتی و انرژی ارائه شده است. این پژوهش دریچه‌ی جدیدی به نزدیکی مسائل مکان‌یابی هاب با چالش‌های واقعی زندگی انسان‌ها گشوده و برای اولین بار حوزه‌های سلامت و انرژی را وارد این مسائل می‌کند.

در حال حاضر تأخیرات و ازدحام در فرودگاه‌ها تهدید اصلی حمل‌ونقل هوایی در آینده است.<sup>[۱]</sup> مطالعه‌ی انجام‌شده توسط مرکز تحقیقات سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی ایالات متحده‌ی آمریکا (CATSR)<sup>۱</sup> با همکاری دانشگاه‌های جرج ماسون و دانشگاه کالیفرنیا، برکلی<sup>۲</sup> (۲۰۰۸)<sup>[۲]</sup> حاکی از آن بود که مجموع هزینه‌های تأخیرات سفرهای هوایی در سال ۲۰۰۷ در ایالات متحده حدود ۳۲٫۹ میلیارد دلار، و مجموع تأخیر سفرهای هوایی مسافران برابر ۲۸۱٫۴ میلیون ساعت یا ۳۲۴۷۷ سال بوده است.

تعداد زیادی از متخصصین علم هوانوردی معتقدند که بعد از چالش ازدحام و تأخیرات، آسیب‌های محیطی مهم‌ترین مانع رشد صنعت حمل‌ونقل هوایی در آینده خواهد بود.<sup>[۱]</sup> نگرانی‌ها درمورد آسیب‌های زیست‌محیطی صنعت حمل‌ونقل هوایی، به‌خصوص آلودگی صوتی و آلودگی هوا در ۵۰ سال گذشته، رشد فزاینده‌ی داشته است.<sup>[۳]</sup> آلودگی صوتی یکی از مهم‌ترین عوامل شکایت‌های مردمی از فرودگاه‌ها بوده و مخالفت‌های شدیدی را با پروژه‌های مرتبط با توسعه‌ی فرودگاه‌ها موجب شده است.<sup>[۴]</sup> آلاینده‌های خروجی از هواپیماها نظیر نیتروژن اکسیدها ( $NO_x$ )، سولفور دی‌اکسید ( $SO_2$ )، ترکیبات آلی فرار (VOC)، کربن مونواکسید (CO)، کربن

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۳۹۲/۱۲/۱۰.

## ۲. ادبیات موضوع

### ۱.۲. مسائل مکان‌یابی هاب

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی مسائل مکان‌یابی هاب به دوره‌ی نخست (از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ میلادی) و دوره‌ی دوم (از سال ۲۰۰۱ به بعد) قابل تفکیک است. در دوره‌ی نخست عمده‌تاً مسائل مختلف مکان‌یابی هاب تعریف و مدل‌سازی‌های گوناگون برای آن ارائه شد و در دوره‌ی دوم به بررسی راه‌حل‌های مختلف این مسائل پرداخته شد.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در دوره‌ی نخست می‌توان به ارائه‌ی مسائل مختلف مکان‌یابی هاب -- همانند مسائل کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات طبقه‌بندی و مدل‌های مورد نظر برای آن‌ها،<sup>[۱۱]</sup> مدل‌سازی نوع ظرفیت دار مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت با فرض مسیر مستقیم بین گره‌های غیرهاب،<sup>[۱۲]</sup> بررسی مسئله‌ی میانه‌ی پی-هاب در حالت تخصیص چندگانه  $^3$ (MapHMP) به طوری که در هر مسیر بین گره‌های غیرهاب قطعاً یک هاب وجود داشته باشد،<sup>[۱۳]</sup> اشاره کرد. اما مؤثرترین رویکرد برای برنامه‌ریزی ریاضی مسائل مکان‌یابی هاب (USApHMP)،<sup>۴</sup> UMApHMP<sup>۵</sup> و CSAHLP<sup>۶</sup> بر پایه‌ی مسیر جریان روی کمان برای هر مبدأ مشخص بنا نهاده شد.<sup>[۱۴-۱۶]</sup> محققین ضمن توجه به مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و محدودیت ظرفیت (CMAHLP)،<sup>۷</sup> برای این مسئله مدل جدیدی ارائه دادند که شبیه مدل‌های پیشین<sup>[۱۵]</sup> برای UMApHMP بود.

در دوره‌ی دوم بیشتر پژوهش‌ها به حل مسائل مختلف مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت مرتبط بود. برای حل مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص تک‌ی بدون محدودیت ظرفیت (USAHLP)<sup>۸</sup> یک الگوریتم ژنتیک ارائه شد.<sup>[۱۸]</sup> همچنین محققین یک راه‌حل ابتکاری براساس ترکیب الگوریتم ژنتیک و آیل شبیه‌سازی شده برای حل USAHLP ارائه دادند.<sup>[۱۹]</sup> راه‌حل‌های ابتکاری دیگری نیز برای USAHLP ارائه شد.<sup>[۲۰]</sup> نمونه‌ی از این راه‌حل‌های ابتکاری، راه‌حل‌های ترکیبی براساس آیل شبیه‌سازی شده، لیست ممنوعه و رویه‌های بهبود بود. این راه‌حل نسبت به راه‌حل‌های ارائه شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک<sup>[۱۸]</sup> هم به لحاظ کیفیت جواب و هم به لحاظ زمان حل دارای عملکرد بهتر بود. از آنجا که تاکنون مقایسه‌ی بین دو راه‌حل ابتکاری انجام نشده می‌توان گفت که این دو الگوریتم از بهترین راه‌حل‌های ابتکاری ارائه شده برای USAHLP هستند. محققین یک الگوریتم شاخه و کران به نام «مکان‌یاب هاب» برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و بدون محدودیت ظرفیت (UMAHLP)<sup>۹</sup> ارائه دادند.<sup>[۲۱]</sup> از مزیت‌های اصلی این الگوریتم به دست آوردن یک حد پائین خوب و نزدیک به حد بالا بود که به میزان زیادی زمان محاسباتی مورد نیاز الگوریتم شاخه و کران را کاهش می‌داد.

بیشتر مطالعات پیشین در حوزه‌ی مسائل مکان‌یابی هاب بر معیار هزینه‌های جریان و احداث شبکه‌ی متمرکز بوده و مطالعات زیادی با رویکرد چندهدفه انجام نشده است. از شاخص‌ترین پژوهش‌های چندهدفه‌ی انجام شده می‌توان به تحقیقی<sup>[۲۲]</sup> اشاره کرد که طی آن با نگاهی متفاوت به CSAHLP، تابع هدف دوم زمان در مدل‌سازی دو هدفه منظور شد. با بررسی پژوهش‌های پیشین در ارتباط با مسائل مکان‌یابی هاب،<sup>[۲۳]</sup> خلأ مطالعاتی مرتبط با مدل‌شدن چالش‌ها و مشکلات واقعی زندگی انسان‌ها در این حوزه مورد توجه قرار گرفت.

هدف اصلی پژوهش حاضر نزدیک کردن مدل‌های مکان‌یابی هاب به دنیای واقعی، و چالش‌های حقیقی پیش‌روی آن است. در این پژوهش به منظور نزدیک‌تر کردن مسائل هاب به واقعیت علاوه بر هزینه، تنوع هواپیماها، مسئله‌ی ازدحام و معیارهای آلودگی هوا، آلودگی صوتی و انرژی به‌عنوان چالش‌های مهم صنعت حمل‌ونقل هوایی در مدل‌سازی مد نظر قرار گرفته است.

### ۳. بیان مسئله‌ی دگرگون‌شده‌ی مکان‌یابی هاب و

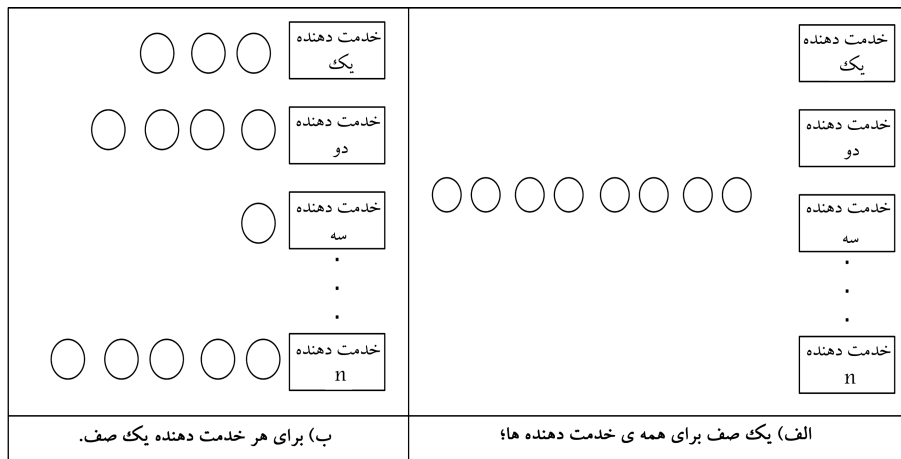
#### فرضیات آن

نمودار کامل  $G(N, A)$  را در نظر بگیرید که در آن  $N = \{1, \dots, n\}$  مجموعه گره‌ها (شهرها) و  $A = N \times N$  مجموعه کمان‌های مستقیم بین گره‌هاست.  $S_k$  مجموعه باند(های) فرودگاه(های) گره  $k$  (شهر) است به گونه‌ی  $k \in N$ .  $W_{ij}$  تقاضای قطعی برحسب مسافر در ساعت اوج بین گره‌مبدأ  $i$  و گره مقصد  $j$  و  $d_{ij}$  فاصله‌ی بین گره‌های  $i$  و  $j$  است. فاصله‌ی مذکور اقلیدسی بوده و نامساوی مثلثی نیز برقرار است.  $V = \{1, \dots, q\}$  مجموعه‌ی انواع هواپیماهای سنگین مسافربری و  $V' = \{1, \dots, q'\}$  مجموعه‌ی انواع هواپیماهای بزرگ مسافربری است. فرض است که از هواپیماهای مسافربری بزرگ نوع  $v' \in V'$  برای نقل و انتقال بین گره غیرهاب و گره‌هاب و از هواپیماهای مسافربری سنگین نوع  $v \in V$  برای نقل و انتقال مسافران بین گره‌های هاب استفاده شود. هر جریان از مبدأ به مقصد به صورت بالقوه شامل سه جزء ادغام (از گره مبدأ به هاب)، انتقال (از هاب به هاب دیگر) و توزیع (از هاب به مقصد) است. هزینه‌ی هر واحد جریان هر جزء متناسب با فاصله‌ی اقلیدسی بین گره‌هاست و در ضریبی مختص آن جزء ضرب می‌شود که به ترتیب از چپ به راست  $\chi, \alpha, \delta$  هستند.  $\alpha$  ثابت و مستقل از اندازه‌ی جریان روی مسیر بین هاب‌ها و به‌خاطر کارایی جزء انتقال کوچک‌تر از ۱ ( $\alpha < 1$ )،  $\delta$  و  $\chi$  برابر ۱ ( $\chi = \delta = 1$ ) در هر مسیر بین مبدأ و مقصد، وجود دست کم یک هاب و شبکه‌ی حاصل از اتصال هاب‌ها، گراف کامل فرض می‌شود. تعداد هاب‌ها از قبل مشخص نیست، لذا برای احداث هاب در گره  $k$  هزینه‌ی ثابتی برابر  $F_k$  در نظر گرفته می‌شود. هر یک از گره‌های غیرهاب را می‌توان به یک یا چند هاب متصل کرد (تخصیص چندگانه). هدف از حل مسئله، مکان‌یابی گره‌های هاب و تخصیص هر یک از گره‌های غیرهاب به گره‌های هاب است.

### ۴. سیستم صف در نظر گرفته شده برای فرودگاه‌ها و

#### فرضیات آن

مشتریان سیستم صف فرودگاه‌ها به دو نوع: هواپیماهای خواهان برخاست و هواپیماهای خواهان نشست تقسیم می‌شوند. باندهای پرواز فعال خادمان سیستم صف هستند که به سه نوع: باندهای مخصوص برخاست؛ باندهای مخصوص نشست؛ باندهای ترکیبی (برای نشست و برخاست) دسته‌بندی می‌شود. زمان خدمت، همان مدت زمان لازم برای انجام عملیات نشست یا برخاست است. شکل ۱ نشان‌گر دو نوع از سیستم‌های دارای چند خدمه است. اختلاف این دو سیستم صف چند خدمه در این است که سیستم الف کلاً دارای یک صف است، در صورتی که در سیستم ب برای هر خدمه یک صف وجود دارد.



شکل ۱. دو نوع سیستم صف چندخادمه.

با توجه به پژوهش‌های گذشته فرض می‌شود که زمان بین ورود هواپیماهای خواهان نشست و نیز زمان بین ورود هواپیماهای خواهان برخاست به سیستم صف فرودگاه دارای توزیع نمایی است. در زمان ازدحام و با ترافیک بسیار بالای هریک از انواع هواپیماها به فرودگاه‌ها در ساعت اوج می‌توان فرض کرد زمان بین ورود هواپیماهای یکسان به هریک از باندهای فعال فرودگاه را نیز دارای توزیع نمایی فرض کرد. از این رو می‌توان هر باند فعال فرودگاه در ساعت اوج را به صورت سیستم صف  $M/G/1$  در نظر گرفت و آن را تحلیل کرد. با جمع‌بندی مطالب مذکور همی فرض‌های منظور شده برای تحلیل صف فرودگاه‌ها عبارت‌اند از:

- در فرایند خدمت‌دهی به عملیات نشست و برخاست، از مراحل عبور هواپیما از باند خزش، رمپ‌ها و گیت‌ها صرف‌نظر شده و فقط بر باندهای فرودگاه تمرکز می‌شود.
- زمان بین ورود هواپیماهای خواهان نشست به (یا برخاست از) فرودگاه در ساعت اوج از هم مستقل و دارای توزیع نمایی با نرخ ورود ثابت است.
- زمان بین ورود تمامی هواپیماها به هریک از فرودگاه‌ها و باندهای فعال مستقل از یکدیگر است.
- زمان بین ورود هواپیماهای خواهان نشست (یا برخاست) یکسان به هر باند فعال در ساعت اوج دارای توزیع نمایی با نرخ ورود ثابت است.
- زمان خدمت هواپیماها (خواهان برخاست یا خواهان نشست) در ساعت اوج در هر باند فعال، از یکدیگر مستقل و دارای توزیع یکسان عمومی با نرخ خدمت ثابت است.
- زمان سرویس هواپیماها وابسته به حالت نیست؛ یعنی به تعداد هواپیماهای موجود در صف بستگی ندارد.
- باندهای یک فرودگاه، مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند.
- نظام صف در باندهای مختص نشست و مختص برخاست نوبتی و در باندهای ترکیبی با اولویت بدون حق انقطاع نشست بر برخاست است.
- فرض می‌شود هر هواپیما به محض ورود به فرودگاه برای انجام نشست یا برخاست وارد صف مربوط به باند اعلام شده توسط ATC می‌شود.

در این پژوهش به دو علت فرودگاه به صورت صف‌هایی جداگانه برای هر خدمه (باند) در نظر گرفته می‌شود:

۱. هریک از انواع هواپیماها نمی‌توانند به صورت بالقوه برای انجام عملیات نشست و برخاست، خدمت لازم را از همه‌ی باندهای فعال دریافت کنند. در این رابطه ملاحظات سه‌گانه‌ی زیر در این پژوهش لحاظ شد:

- ترکیب‌بندی باندهای فرودگاه (اختصاص هریک از باندها به عملیات نشست یا برخاست یا نشست و برخاست با توجه به طبقه‌ی آب و هوایی غالب)؛
- سرعت بادپهلوی<sup>۱۰</sup> مجاز (برای هر باند مشخص، مؤلفه‌ی بادپهلوی عبارت است از مؤلفه‌ی از بردار سرعت باد غالب<sup>۱۱</sup> در آن فرودگاه که عمود بر خط مرکزی باند است. با توجه به استاندارد سازمان هوانوردی فدرال (FAA) برای هریک از انواع هواپیماها سرعت بادپهلوی مجاز برای انجام عملیات مشخص است).

-- طول باند لازم برای انجام عملیات نشست و برخاست هریک از انواع هواپیماها.

۲. مرکز کنترل عبور و مرور هوایی (ATC) مشخص می‌کند که هر هواپیما از چه باندی باید عملیات خود را انجام دهد. فرض بر آن است که هر هواپیما به محض ورود به فرودگاه برای انجام نشست یا برخاست وارد صف مربوط به باند اعلام شده توسط ATC می‌شود.

برای ارائه‌ی مدل مکان‌یابی فرودگاه‌های هاب پرازدحام، استفاده از فرض‌های ساده‌کننده ضروری است؛ چراکه در غیر این صورت مدل‌سازی یا حل مدل ناممکن یا بسیار دشوار می‌شود. در این پژوهش از تحلیل ساعت اوج<sup>۱۲</sup> برای طراحی شبکه‌ی هاب و کمان استفاده می‌شود. تحلیل ساعت اوج نوعی تحلیل در بدترین شرایط است که با بهبود در ساعت اوج ما را به کاهش اثرات صف در طول ساعات غیر اوج امیدوار می‌کند. از آنجا که شبکه‌ی حمل و نقل هوایی برای ساعت اوج مجموع جریان مسافران ورودی و خروجی طراحی می‌شود، سیستم صف فرودگاه‌ها نیز در ساعت اوج مجموع جریان مسافران ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود. از مزایای تحلیل ساعت اوج آن است که فرض ثابت و مستقل بودن نرخ ورود و سرویس در یک بازه زمانی را نسبت به کل شبانه‌روز قابل پذیرش‌تر می‌کند.

## ۵. مدل‌سازی

### ۱.۵. مدل‌های فرعی

در این بخش به منظور جلوگیری از ازدحام و شلوغی در فرودگاه‌ها در ساعت اوج، با ارائه‌ی سه زیرمدل غیرخطی جداگانه، نسبت به تعیین ظرفیت بهینه‌ی باندهای مختص نشست، مختص برخاست و ترکیبی اقدام می‌شود و از آن در مدل اصلی برای طراحی شبکه‌ی حمل و نقل هوایی استفاده خواهد شد. نمادهای مورد استفاده عبارتند از:

$N$ : مجموعه گره‌های (شهرهای) مختلف؛

$S_k$ : مجموعه باندهای (های) فرودگاه (های) شهر  $k \in N$ ؛

$s_k$ : اعضای مجموعه  $S_k$ ؛

$S_k^l$ : مجموعه باندهای (های) ترکیبی فرودگاه (های) شهر  $k \in N$ ؛

$S_k^t$ : مجموعه باندهای (های) مخصوص نشست فرودگاه (های) شهر  $k \in N$ ؛

$S_k^r$ : مجموعه باندهای (های) مخصوص برخاست فرودگاه (های) شهر  $k \in N$ ؛

$S_k^l \cup S_k^t \cup S_k^r = S_k, \forall k \in N$  موقعیت<sup>۱۳</sup> می‌تواند نشست (landing) یا برخاست (takeoff) باشد؛

$\mu_{s_k}$ : نرخ سرویس باند  $s_k \in S_k$ ؛

$Wq_{s_k}^{landing}$ : متوسط زمان انتظار در صفِ هواپیماهای خواهان فرود بر باند  $s_k \in S_k$ ؛

$Wq_{s_k}^{takeoff}$ : متوسط زمان انتظار در صفِ هواپیماهای خواهان برخاست از باند  $s_k \in S_k$ ؛

$ST^{landing}$ : حد بالای متوسط زمان انتظار در صفِ هواپیماهای خواهان فرود؛  
 $ST^{takeoff}$ : حد بالای متوسط زمان انتظار در صفِ هواپیماهای خواهان برخاست؛  
 $t_{s_k}$ : متغیر تصادفی مربوط به زمان سرویس باند  $s_k \in S_k$ ؛

$p_n$ : احتمالاتِ حدی مربوط به بودن  $n$  مشتری در سیستم صفِ باند مورد نظر در هر لحظه از زمان در درازمدت؛

$\lambda_{s_k}^{position}$ : تعداد هواپیماهای خواهان نشست (یا برخاست)، وارد شده در ساعت یک به باند  $s_k \in S_k$ ؛

$\lambda \max_{s_k}^{position}$ : ظرفیت بهینه‌ی باند  $s_k \in S_k$  برای عملیات نشست یا برخاست؛ یا به عبارتی بیشینه هواپیماهای خواهان نشست (یا برخاست) که می‌توانند در ساعت یک به باند  $s_k$  وارد شوند. بدیهی است برای باند مخصوص نشست  $\lambda \max_{s_k}^{takeoff}$  و برای باند مخصوص برخاست  $\lambda \max_{s_k}^{landing}$  برابر صفر است.

در مدل  $M/G/1$  با  $N$  اولویت بدون حق انقطاع، اگر  $i$  اندیس مربوط به اولویت باشد به طوری که  $i = 1$  دارای بالاترین اولویت و  $i = N$  دارای پایین‌ترین اولویت و نیز  $\lambda$  نرخ ورود کل،  $\lambda_k$  نرخ ورود هر اولویت،  $s$  متغیر تصادفی مربوط به زمان سرویس همه مشتریان، و نرخ سرویس همه اولویت‌ها نیز یکسان و برابر  $\mu$  باشد، می‌توان نوشت:<sup>[۲۴]</sup>

$$W_q^{(i)} = \frac{\frac{\lambda}{\nu} \times \left( var(s) + \frac{1}{\mu^2} \right)}{\left( 1 - \sigma_{i-1} \right) \times \left( 1 - \sigma_i \right)} \quad (۱)$$

$$\sigma_0 = 1, \quad \sigma_i = \sum_{k=1}^i \rho_k, \quad \rho_k = \frac{\lambda_k}{\mu}$$

که در آن  $W_q^{(i)}$  متوسط زمان انتظار در صفِ مشتری با اولویت  $i$ ام است. همان‌طور که گفته شد باندهای پرواز فعال، خادمان سیستم صف هستند که به سه نوع: ۱. باندهای ترکیبی، که در آن نشست بر برخاست اولویت دارد؛ ۲. باندهای

مخصوص نشست؛ ۳. باندهای مخصوص برخاست تقسیم می‌شوند. برای هر یک از انواع مذکور برنامه‌ریزی غیرخطی جداگانه‌ی به منظور به دست آوردن ظرفیت بهینه‌ی باند برای عملیات نشست و برخاست ارائه می‌شود. مدل ۱-NLP برای باندهای ترکیبی:

$$\max \lambda_{s_k}^{takeoff} + \lambda_{s_k}^{landing} \quad (۲)$$

S.t.

$$Wq_{s_k}^{landing} = \frac{\frac{\lambda_{s_k}^{takeoff} + \lambda_{s_k}^{landing}}{\nu} \times \left( var(t_{s_k}) + \frac{1}{\mu_{s_k}^2} \right)}{1 - \frac{\lambda_{s_k}^{landing}}{\mu_{s_k}}} \leq ST^{landing} \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^l \quad (۳)$$

$$Wq_{s_k}^{takeoff} = \frac{\frac{\lambda_{s_k}^{takeoff} + \lambda_{s_k}^{landing}}{\nu} \times \left( var(t_{s_k}) + \frac{1}{\mu_{s_k}^2} \right)}{\left( 1 - \frac{\lambda_{s_k}^{takeoff} + \lambda_{s_k}^{landing}}{\mu_{s_k}} \right) \left( 1 - \frac{\lambda_{s_k}^{landing}}{\mu_{s_k}} \right)} \leq ST^{takeoff} \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^l \quad (۴)$$

$$\frac{\lambda_{s_k}^{takeoff} + \lambda_{s_k}^{landing}}{\mu_{s_k}} \leq 1 \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^l \quad (۵)$$

$$\sum_{n=0}^{b+1} p_n \geq 1 - \theta \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^l \quad (۶)$$

$$\lambda_{s_k}^{takeoff}, \lambda_{s_k}^{landing}, Wq_{s_k}^{landing}, Wq_{s_k}^{takeoff} \geq 0 \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^l \quad (۷)$$

تابع هدف ۲ مجموع تعداد ورود هواپیماهای خواهان نشست و برخاست در ساعت اوج به باند مورد نظر را بیشینه می‌کند؛ این مقدار بیشینه همان ظرفیت بهینه‌ی باند است. با محدودیت ۳ متوسط زمان انتظار هواپیماهای خواهان فرود کم‌تر از  $ST^{landing}$  و با محدودیت‌های ۴ متوسط زمان انتظار هواپیماهای خواهان برخاست کم‌تر از  $ST^{takeoff}$  قرار داده شده است. محدودیت ۵ شرط پایداری سیستم صف است. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که احتمال انتظار بیش از  $b$  هواپیما در هر لحظه در صف باند مورد نظر، از مقدار ثابت  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) بیشتر نشود. جواب‌های حاصل از مدل‌های غیرخطی فوق به صورت  $\lambda_{s_k}^{landing*}$  یا  $\lambda \max_{s_k}^{landing}$  و  $\lambda_{s_k}^{takeoff*}$  یا  $\lambda \max_{s_k}^{takeoff}$  خواهد بود که به‌عنوان پارامتر ظرفیت باندها در مدل اصلی به کار می‌رود.

مدل ۲-NLP برای باندهای مختص عملیات نشست: این مدل شبیه به مدل ۱-NLP است با این تفاوت که در آن  $\lambda_{s_k}^{takeoff} = 0$ ، محدودیت ۴ حذف، و  $S_k^l$  به  $S_k^t$  تغییر می‌کند.

مدل ۳-NLP برای باندهای مختص عملیات برخاست: این مدل شبیه به مدل ۱-NLP است با این تفاوت که در آن  $\lambda_{s_k}^{landing} = 0$ ، محدودیت‌های ۳ و ۴ حذف، محدودیت ۸ اضافه و  $S_k^l$  به  $S_k^r$  تغییر می‌کند.

$$Wq_{s_k}^{takeoff} = \frac{\frac{\lambda_{s_k}^{takeoff}}{\nu} \times \left( left(var(t_{s_k}) + \frac{1}{\mu_{s_k}^2} right) \right)}{1 - \frac{\lambda_{s_k}^{takeoff}}{\mu_{s_k}}} \leq T^{takeoff} \quad \forall k \in N, \forall s_k \in S_k^r \quad (۸)$$

تابع هدف ۹ مجموع هزینه‌های جریان و احداث هاب‌ها را کمینه می‌کند. محدودیت ۱۰ تضمین می‌کند که همه‌ی جریان از هر مبدأ از همان مبدأ خارج شود. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که همه‌ی جریان‌ها برای هر جفت مبدأ - مقصدی به مقصد صحیح خود وارد شوند. محدودیت ۱۲ تساوی بقای جریان در هر هاب را بیان می‌کند. محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ تضمین می‌کنند که گره‌های هاب به ترتیب برای هر جزء توزیع و ادغام از هر مسیری مورد استفاده قرار گیرد. در واقع محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ فرض عدم وجود مسیر مستقیم بین گره‌های هاب را تضمین می‌کنند. رابطه‌ی ۱۵ محدودیت ظرفیت هر هاب را اعمال می‌کند.

### ۳.۵. توصیف مدل چندهدفه

در اکثر مطالعات پیشین در زمینه‌ی مسائل مکان‌یابی هاب فقط «هزینه» به عنوان تابع هدف اصلی در مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. اما چنان که در مقدمه گفته شد امروزه در شرایط واقعی صنعت حمل‌ونقل هوایی علاوه بر هزینه معیارهای دیگری چون آلودگی هوا، آلودگی صوتی و انرژی نیز حائز اهمیت است. در ادامه به نحوه‌ی مدل کردن توابع هدف مورد نظر و محدودیت‌های اضافه شده به مدل پایه خواهیم پرداخت.

#### ۱.۳.۵. تابع هدف هزینه

ابری و همکاران تابع هزینه‌ی کلاسیک را برای MAHLP مطابق رابطه‌ی ۹ ارائه کرده‌اند. این تابع مجموع هزینه‌های جریان و احداث هاب را محاسبه می‌کند. در این پژوهش با توجه به در نظر گرفتن تنوع هواپیماها این تابع کلاسیک به رابطه‌ی ۱۸ تغییر می‌کند.

$$\sum_i \left[ \sum_k \sum_{v'} \chi c^{v'} d_{ik} Z_{ik}^{(v')} + \sum_k \sum_l \sum_v \alpha c^v d_{kl} Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_l \sum_j \sum_{v'} \delta c^{v'} d_{lj} X_{lj}^{(i,v')} \right] + \sum_k F_k H_k. \quad (18)$$

$Z_{ik}^{(v')}$  جریان برحسب هواپیمای بزرگ نوع  $v' \in V'$  از گره  $i$  به گره‌ی هاب  $k$ ؛  $Y_{kl}^{(i,v)}$  جریان برحسب هواپیمای سنگین نوع  $v \in V$  از هاب  $k$  به هاب  $l$  با شروع از گره  $i$ ؛  $X_{lj}^{(i,v')}$  جریان برحسب هواپیمای بزرگ نوع  $v' \in V'$  از هاب  $l$  به گره  $j$  با شروع از گره  $i$ ؛  $c^v$  هزینه پرواز هواپیمای نوع  $v \in V$  در واحد مسافت؛  $c^{v'}$  هزینه پرواز هواپیمای نوع  $v' \in V'$  در واحد مسافت.

#### ۲.۳.۵. تابع هدف آلودگی هوا و مصرف سوخت

به‌طور کلی عملیات هواپیماها به دو بخش چرخه‌ی نشست/برخاست (LTO)<sup>۱۵</sup> و پرواز مستوی<sup>۱۶</sup> تقسیم می‌شود. چرخه‌ی نشست و برخاست (LTO) در برگیرنده‌ی همه‌ی فعالیت‌های هواپیما در نزدیکی فرودگاه است که در پایین‌تر از ارتفاع ۳۰۰۰ فوتی (۱۰۰۰ متری) رخ می‌دهد. بنابراین خزش برای برخاست<sup>۱۷</sup>، برخاست، آمادگی برای اوج<sup>۱۸</sup>، تقرب - فرود<sup>۱۹</sup> و خزش بعد از فرود<sup>۲۰</sup> از جمله فعالیت‌های هواپیما در چرخه‌ی LTO محسوب می‌شود.<sup>[۲۵]</sup> پرواز مستوی دیگر فعالیت‌های هواپیما را در برمی‌گیرد که در بالاتر از ارتفاع مذکور رخ می‌دهد. طبق تعریف، اوج‌گیری<sup>۲۱</sup> در پایان آمادگی برای اوج، پرواز مستوی و نزول<sup>۲۲</sup> از ارتفاع پرواز مستوی تا شروع عملیات تقرب - فرود، فعالیت‌های هواپیما در پرواز مستوی را شکل می‌دهد (شکل ۲).<sup>[۲۶]</sup>

به منظور اجرای مدل‌های فرعی، پارامتر  $b$  برابر ۲ و پارامتر  $\theta$  برابر ۰.۵ انتخاب شد. با انتخاب این پارامترها ظرفیت بهینه‌ی حاصل از مدل‌های فرعی تضمین می‌کند که به احتمال حداقل ۹۵٪ بیش از ۲ هواپیما منتظر عملیات بر روی هر باند نیست. ضمناً هر دو پارامتر  $ST^{takeoff}$  و  $ST^{landing}$  برابر ۵ دقیقه انتخاب شد. این پارامترها تضمین می‌کنند که متوسط زمان انتظار هواپیماها برای انجام عملیات نشست و برخاست در هر باند بیش از ۵ دقیقه نیست.

لازم به ذکر است که می‌توان نشان داد که در مدل  $M/G/1$  احتمالات حدی  $p_n$  به هیچ وجه تابعی از نظام سیستم نیست. بنابراین تابع مولد احتمال مذکور برای مدل  $M/G/1$  با  $N$  اولویت بدون حق انقطاع نیز صادق است. همچنین براساس آنچه در ادبیات موضوع صف فرودگاه‌ها گفته شد در این بخش توزیع زمان سرویس باندها ارلانگ با پارامتر Shape ۳ انتخاب شد. چنانچه زمان سرویس دارای توزیع ارلانگ با پارامتر شکل  $k'$  و پارامتر نرخ  $\mu$  باشد، آنگاه  $\frac{1}{k' \times \mu} = var(s)$  زمان سرویس) و تابع مولد احتمالات حدی مربوط تعداد مشتریان در سیستم صف  $M/E_{k'}/1$  در هر لحظه در درازمدت با استفاده از تابع مولد احتمالات حدی صف  $M/G/1$  حاصل می‌شود.<sup>[۲۴]</sup>

### ۲.۵. مدل پایه برای مدل‌سازی نهایی

در این پژوهش مدل ابری و همکاران<sup>[۱۷]</sup> برای توسعه انتخاب شد. آن‌ها در این مدل‌سازی مشابه رویکرد ارنست و کریشنامورتی<sup>[۱۶-۱۴]</sup> سه مجموعه متغیر تصمیم‌گیری مطابق با سه جزء از مسیر مبدأ - مقصد تعریف کردند. این متغیرهای تصمیم‌گیری عبارت‌اند از:  $Z_{ik}$  جریان از مبدأ  $i$  به هاب  $k$  (مربوط به جز ادغام)،  $Y_{kl}^i$  جریان از هاب  $k$  به هاب  $l$  با مبدأ  $i$  (مربوط به جزء انتقال)، و  $X_{lj}^i$  جریان از هاب  $l$  به مقصد  $j$  با مبدأ  $i$  (مربوط به جزء توزیع). متغیر تصمیم‌گیری دیگر  $H_k$  است. اگر گره  $k$  هاب باشد؛  $H_k$  برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است. ابری و همکاران با استفاده از متغیرهای بالا مسئله‌ی CMAHLP را به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MIP)<sup>۱۴</sup> زیر مدل کردند:

$$\min \sum_i \left[ \sum_k \chi d_{ik} Z_{ik} \sum_k \sum_l \alpha d_{kl} Y_{kl}^i + \sum_l \sum_j \delta d_{lj} X_{lj}^i \right] + \sum_k F_k H_k \quad (9)$$

S.t.

$$\sum_k Z_{ik} = \sum_j W_{ij} \quad \forall i, \quad (10)$$

$$\sum_l X_{lj}^i = w_{ij} \quad \forall i, j, \quad (11)$$

$$Z_{ik} + \sum_l Y_{lk}^i = \sum_l Y_{kl}^i + \sum_j X_{kj}^i \quad \forall i, k, \quad (12)$$

$$\sum_i X_{lj}^i \leq \sum_i W_{ij} H_l \quad \forall j, l, \quad (13)$$

$$Z_{ik} \leq \sum_j W_{ij} H_k \quad \forall i, k, \quad (14)$$

$$\sum_i Z_{ik} \leq \Gamma_k H_k \quad \forall k, \quad (15)$$

$$Z_{ik}, Y_{lk}^i, X_{lj}^i \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, \quad (16)$$

$$H_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V. \quad (17)$$

$$\sum_{i \in N} \left[ \sum_{k \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_p^{(v', LTO)} + f_{fuel}^{v', cruise} (d_{ik}) \times EF_p^{cruise} \right) Z_{ik}^{(v')} \right. \\ \left. + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \sum_{v \in V} \left( EF_p^{(v, LTO)} + f_{fuel}^{v, cruise} (d_{kl}) \times EF_p^{cruise} \right) Y_{kl}^{(i, v)} \right. \\ \left. + \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_p^{(v', LTO)} + f_{fuel}^{v', cruise} (d_{lj}) \times EF_p^{cruise} \right) X_{lj}^{(i, v')} \right] \quad \forall p \in \{CO_2, SO_2\}. \quad (20)$$

همچنین می‌توان تابع هدف مربوط به مجموع میزان مصرف سوخت را به صورت رابطه‌ی ۲۱ نوشت:

$$\sum_{i \in N} \left[ \sum_{k \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_{fuel}^{(v', LTO)} + f_{fuel}^{v', cruise} (d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(v')} \right. \\ \left. + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \sum_{v \in V} \left( EF_{fuel}^{(v, LTO)} + f_{fuel}^{v, cruise} (d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i, v)} \right. \\ \left. + \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_{fuel}^{(v', LTO)} + f_{fuel}^{v', cruise} (d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i, v')} \right] \quad (21)$$

### ۳.۳.۵. تابع هدف آلودگی صوتی

به‌طور کلی اندازه‌گیری‌هایی که برای سنجش سروصدای فرودگاه‌ها استفاده می‌شود به دو جزء الف (اندازه‌گیری مربوط به تک رویداد که به حرکت یک هواپیما مرتبط است) و ب (اندازه‌گیری جمعی که اثر جمعیتی حرکت تعداد زیادی هواپیما در یک بازه زمانی مشخصی را منعکس می‌کند) تقسیم می‌شود. یکی از سنججهایی که برای توصیف اندازه‌گیری مربوط به تک رویداد استفاده می‌شود SEL<sup>۲۴</sup> است. این سنججه همه‌ی اندازه‌گیری ثبت شده از تراز شدت صوت یک هواپیما در طول بازه زمانی دلخواه را در نظر گرفته، آسیب‌های جمعی حاصل از سروصدای یک هواپیما بر شونده را اندازه‌گیری می‌کند.

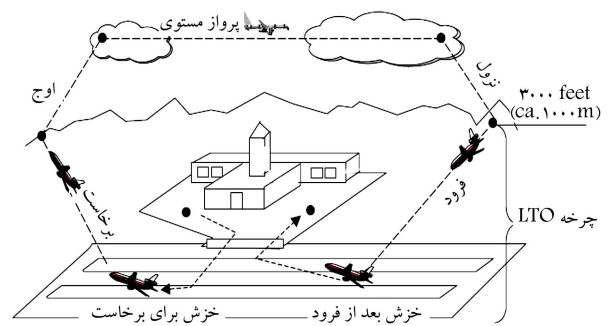
تراز شدت صوت معادل<sup>۲۵</sup> (Leq) یکی از سنججه‌های جمعی استاندارد سازمان هوایی فدرال آمریکا (FAA) است. این سنجش میانگین سروصدای تعدادی هواپیما در طول بازه زمانی مشخصی را بیان می‌کند و براساس رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود.<sup>[۱]</sup>

SEL: SEL<sub>j</sub> محاسبه شده از حرکت هواپیمای زام (برحسب دسی‌بل وزن‌دار) (dBA)<sup>۲۶</sup> و T: طول بازه زمانی (برحسب ثانیه) برای محاسبه‌ی Leq.

$$Leq = 10 \times \log \left( \frac{1}{T} \sum_{j=1}^M 10^{\frac{SEL_j}{10}} \right). \quad (22)$$

به‌منظور مدل‌سازی شاخص آلودگی صوتی تنها گره‌هایی مد نظر قرار می‌گیرد که در معرض آلودگی صوتی قرار دارند. این نقاط با حرف f و مجموعه‌ی آن‌ها با حرف F نشان داده می‌شود. همچنین به‌منظور کمی کردن میزان آلودگی صوتی هواپیماها از E(SEL) یعنی مقدار مورد انتظار SEL استفاده می‌شود و فرض می‌شود که مقدار آن برای هواپیماهای هم‌نوع یکسان است. به‌منظور مدل‌سازی آلودگی صوتی از نمادهای زیر استفاده می‌شود:

T: طول بازه زمانی مورد نظر برحسب ثانیه برای محاسبه‌ی شدت سروصدا؛  
E(SEL<sub>u</sub><sup>approach</sup>): متوسط SEL تولید شده توسط هواپیمای u در هنگام نشست برحسب دسی‌بل وزن‌دار؛



شکل ۲. بخش‌های مختلف پرواز استاندارد هواپیماها.

به‌طور کلی سه روش بسیار ساده، ساده و با جزئیات برای محاسبه‌ی میزان آلودگی هواپیماها توسط آژانس محیط‌زیست اروپا (EEA)<sup>۲۳</sup> توسعه داده شده است.<sup>[۲۶]</sup> در این پژوهش از روش با جزئیات که روش دقیق‌تری است استفاده می‌شود. در این روش میزان هر یک از آلاینده‌های CO, NO<sub>x</sub>, VOC, SO<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> و سوخت مصرفی در چرخه‌ی LTO برای هر یک از انواع هواپیماها میزان ثابتی است و برای محاسبه‌ی آلاینده‌ها و سوخت مصرفی در پرواز مستوی از تابع تک‌یی خطی برحسب مسافت استفاده می‌شود. به‌منظور صورت‌بندی ریاضی آلودگی هوا در مدل‌سازی نهایی نمادهای زیر تعریف می‌شود:

P: مجموعه‌ی انواع آلاینده‌های تولیدی هواپیماها،

$P = \{VOC, NO_x, CO, CO_2, SO_2\}$ ;  
 $EF_p^{(u, LTO)}$ : میزان تولید آلاینده‌ی p برای هواپیمای u در هر چرخه‌ی LTO؛

$EF_{fuel}^{(u, LTO)}$ : میزان مصرف سوخت هواپیمای u در هر چرخه‌ی LTO؛  
 $EF_p^{cruise}$ : نسبت میزان آلاینده‌ی p ∈ {CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>} خروجی از هر واحد سوخت مصرفی در بخش پرواز مستوی؛

$f_p^{u, cruise}(d)$ : مقدار تابع تک‌یی خطی مربوط به میزان آلاینده‌ی p ∈ {VOC, NO<sub>x</sub>, CO} خروجی از هواپیمای u ∈ U = V ∪ V' برحسب مسافت پیموده شده در بخش پرواز مستوی؛

$f_{fuel}^{u, cruise}(d)$ : مقدار تابع تک‌یی خطی مربوط به میزان سوخت مصرفی هواپیمای u ∈ U برحسب مسافت پیموده شده در پرواز مستوی.

بدین ترتیب میزان آلاینده‌ی p ∈ {VOC, NO<sub>x</sub>, CO} تولیدی هواپیمای u با پیمودن فاصله‌ی dij برابر است با  $EF_p^{(u, LTO)} + f_p^{u, cruise}(d_{ij})$ ، و میزان آلاینده‌ی p ∈ {CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>} تولیدی هواپیمای u با پیمودن فاصله‌ی dij برابر است با  $EF_p^{(u, LTO)} + f_{fuel}^{u, cruise}(d_{ij}) \times EF_p^{cruise}$ . پس می‌توان تابع هدف مربوط به آلودگی هوا را به صورت رابطه‌ی ۱۹ برای آلاینده‌های VOC و NO<sub>x</sub> و CO به صورت رابطه‌ی ۲۰ برای آلاینده‌های SO<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> نوشت:

$$\sum_{i \in N} \left[ \sum_{k \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_p^{(v', LTO)} + f_p^{v', cruise} (d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(v')} \right. \\ \left. + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \sum_{v \in V} \left( EF_p^{(v, LTO)} + f_p^{v, cruise} (d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i, v)} \right. \\ \left. + \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v' \in V'} \left( EF_p^{(v', LTO)} + f_p^{v', cruise} (d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i, v')} \right] \quad (19) \\ \forall p \in \{VOC, NO_x, CO\},$$

$n^{v'}$ : تعداد هواپیماهای نوع  $v' \in V'$  که در جزء ادغام و توزیع (بین گره‌های هاب و غیرهاب) پرواز می‌کنند (رابطه‌ی ۳۰).

$$n^v = \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N, l \neq k} Y_{kl}^{(i,v)} \quad \forall v \in V, \quad (29)$$

$$n^{v'} = \sum_{i \in N} \sum_{l \in N} \sum_{j \in N, j \neq l} X_{lj}^{(i,v')} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N, k \neq i} Z_{ik}^{(v')} \quad \forall v' \in V'. \quad (30)$$

اگر  $y^v$  تعداد هواپیماهای در دسترس نوع  $v \in V$  و  $y^{v'}$  تعداد هواپیماهای در دسترس نوع  $v' \in V'$  باشد محدودیت‌های ۳۱ و ۳۲ به مدل اضافه می‌شود.

$$\sum_i \sum_k \sum_{l, l \neq k} Y_{kl}^{(i,v)} \leq y^v \quad \forall v, \quad (31)$$

$$\sum_i \sum_l \sum_{j, j \neq l} X_{lj}^{(i,v')} + \sum_i \sum_{k, k \neq i} Z_{ik}^{(v')} \leq y^{v'} \quad \forall v'. \quad (32)$$

#### ۴.۵. مدل چندهدفه‌ی نهایی

با توجه به مدل پایه، توابع هدف و محدودیت‌های توسعه داده شده مدل نهایی چندهدفه به صورت زیر توسعه داده می‌شود. نمادهای مورد استفاده در ارائه‌ی مدل عبارت‌اند از:

$R_{s_k}$ : مجموعه‌ی انواع هواپیماهای عضو  $V \cup V'$  که اجازه‌ی استفاده‌ی از باند  $s_k \in S_k$  را ندارند. اعضای این مجموعه  $(r_{s_k})$  با توجه به ملاحظات سه‌گانه‌ی مطرح شده در بخش ۴ تعیین می‌شوند.

$\lambda_{s_k}^{(u, position)}$ : تعداد هواپیماهای از نوع  $u \in U$  خواهان نشست (یا برخاست)، وارد شده در ساعت اوج به باند  $s_k \in S_k$ !

$\lambda_{s_k}^{position}$ : تعداد هواپیماهای خواهان نشست (یا برخاست)، وارد شده در ساعت اوج به باند  $s_k \in S_k$ !

$\lambda \max_{s_k}^{position}$ : ظرفیت بهینه‌ی باند  $s_k \in S_k$  برای عملیات نشست (یا برخاست)، و به عبارتی بیشینه هواپیماهای خواهان نشست (یا برخاست) که می‌توانند در ساعت اوج به باند  $s_k$  وارد شوند. این پارامتر از حل بهینه‌ی مدل‌های ۱-NLP، ۲-NLP و ۳-NLP حاصل می‌شود؛ به عبارتی پارامتر  $\lambda \max_{s_k}^{position}$  در مدل نهایی  $(CM A H L M O P - R)$  که همان مسئله‌ی دگرگون‌شده‌ی چندهدفه‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و با محدودیت ظرفیت است خود متغیر تصمیم مدل‌های ۱-NLP، ۲-NLP و ۳-NLP است. بدیهی است که برای باند مخصوص نشست  $\lambda \max_{s_k}^{takeoff}$  و برای باند مخصوص برخاست  $\lambda \max_{s_k}^{landing}$  برابر صفر است.

مدل  $CM A H L M O P - R$ :

$$\min (28), (18) - (21)$$

S.t.

$$(17), (26) - (23), (31), (32)$$

$$\sum_{v'} \sum_k Z_{ik}^{(v')} t^{v'} = \sum_j W_{ij} \quad \forall i, \quad (33)$$

$$\sum_{v'} \sum_L X_{lj}^{(i,v')} t^{v'} = W_{ij} \quad \forall i, j, \quad (34)$$

$E(SEL_{u}^{departure})$ : متوسط SEL تولید شده توسط هواپیماهای  $u$  در هنگام برخاست برحسب دسی‌بل وزن‌دار؛

$(Leq)_f$ : تراز شدت صوت معادل در گره  $f$  برحسب دسی‌بل وزن‌دار؛  
 $\lambda_f^{(u, position)}$ : تعداد هواپیماهای نوع  $u \in U$  خواهان نشست (یا برخاست)، وارد شده در ساعت اوج به فرودگاه(های) شهر  $f \in F$ . این متغیر با روابط ۲۳ تا ۲۶ حاصل می‌شود.

$$\lambda_f^{(v, landing)} = \sum_i \sum_f Y_{lf}^{(i,v)} \quad \forall f, v, \quad (23)$$

$$\lambda_f^{(v', landing)} = \sum_{i, i \neq f} Z_{if}^{(v')} + \sum_j \sum_{i, i \neq f} X_{if}^{(j,v')} \quad \forall f, v', \quad (24)$$

$$\lambda_f^{(v, takeoff)} = \sum_i \sum_l Y_{fl}^{(i,v)} \quad \forall f, v, \quad (25)$$

$$\lambda_f^{(v', takeoff)} = \sum_{i, i \neq f} Z_{fi}^{(v')} + \sum_i \sum_{j, j \neq f} X_{fj}^{(i,v')} \quad \forall f, v'. \quad (26)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ تراز شدت صوت معادل در گره  $f$  مطابق رابطه‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود.

$$\forall b \in B : (Leq)_b = 10 \times \log \left\{ \frac{1}{T} \times \left[ \sum_{v \in V} \lambda_b^{(v, landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{approach})}{10}} + \sum_{v \in V} \lambda_b^{(v, takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{departure})}{10}} + \sum_{v' \in V'} \lambda_b^{(v', landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_{v'}^{approach})}{10}} + \sum_{v' \in V'} \lambda_b^{(v', takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_{v'}^{departure})}{10}} \right] \right\}. \quad (27)$$

رابطه‌ی ۲۷ غیرخطی است و مطابق رابطه‌ی خطی می‌شود.

$$\forall b \in B : 10^{\left(\frac{(Leq)_b}{10}\right)} \times T = \sum_{v \in V} \lambda_b^{(v, landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{approach})}{10}} + \sum_{v \in V} \lambda_b^{(v, takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{departure})}{10}} + \sum_{v' \in V'} \lambda_b^{(v', landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_{v'}^{approach})}{10}} + \sum_{v' \in V'} \lambda_b^{(v', takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_{v'}^{departure})}{10}}. \quad (28)$$

#### ۴.۳.۵. محدودیت تعداد هواپیماهای در دسترس از هر نوع

به منظور اعمال محدودیت مربوط به تعداد هواپیماهای در دسترس نمادهای زیر تعریف می‌شود:

$n^v$ : تعداد هواپیماهای نوع  $v \in V$  که در جزء انتقال (بین گره‌های هاب) پرواز می‌کنند (رابطه‌ی ۲۹).

حذف روابط ۲۳ تا ۲۶، ۳۸ تا ۴۲، و ۴۴ مدل  $CMApHMP - R$  به مدل  $UMApHMP - R$  (مسئله‌ی دگرگون‌شده‌ی تک هدفی میانه‌ی پی - هاب با تخصیص چندگانه و بدون محدودیت ظرفیت) تبدیل می‌شود.

### ۶. داده‌های موردنیاز

به منظور ارزیابی مدل ارائه شده، از مجموعه داده‌ی CAB به عنوان ماتریس جریان پایه استفاده می‌شود.<sup>۲۷</sup> جریان این مجموعه داده برحسب مسافران هوایی داخلی در سال ۱۹۷۰ بین ۲۵ شهر آمریکا (شکل ۳) است. کل جریان در مجموعه داده‌ی CAB برابر ۸۵۴۰۰۰۶ مسافر است که ۵۱٪ از کل جریان مسافران داخلی بین تمامی شهرهای آمریکا را در بر می‌گیرد.<sup>[۲۷]</sup> در این پژوهش، سال ۲۰۰۴ به علت در دسترس بودن تمامی داده‌های مورد نیاز ملاک قرار داده می‌شود. با توجه به جریان ماهانه‌ی مسافران هوایی داخلی در سال ۲۰۰۴<sup>[۲۸]</sup> مشخص می‌شود که ماه اوج سفرهای هوایی داخلی در سال ۲۰۰۴ در کشور آمریکا ماه جولای با ۵۹۶۱۴۲۹۱ مسافر بوده است. شکل ۴ نمودار کل جریان سالانه‌ی مسافران داخلی شهرهای آمریکا از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد.

چنان‌که از شکل ۴ مشخص است یک رابطه‌ی خطی بین تعداد مسافران هوایی داخلی کشور آمریکا در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ برقرار است. لذا می‌توان نسبت مسافران داخلی ماه اوج سال ۲۰۰۴ (۵۹۶۱۴۲۹۱) به مسافران داخلی ماه اوج سال ۱۹۷۰ ( $8540006 \times (100/51)$ ) را در ماتریس جریان مجموعه داده‌ی CAB ضرب و آن را به عنوان ماتریس جریان بین شهرها در ماه اوج سال ۲۰۰۴ فرض کرد. با استفاده از ضریب ۰/۱ از جدول‌های مربوطه<sup>[۱]</sup> (ضرایب تبدیل برای تخمین تعداد مسافران ساعت اوج از مجموع مسافران روزانه در ماه اوج) ماتریس جریان در ساعت اوج سال ۲۰۰۴ قابل تخمین است.

با توجه به در نظر گرفتن اوج کل مسافران (هم ورودی و هم خروجی) براساس جدول‌های مربوطه<sup>[۱]</sup> (الگوی محتمل ساعت اوج مسافران در فرودگاه‌های بزرگ) ساعت اوج ۱۶:۰۰ تا ۱۶:۵۹ در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مربوط به آب‌وهوای



- |                   |                 |                   |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| ۱- آتلانتا        | ۹- دتريت        | ۱۷- نیویورک       |
| ۲- بالتیمور       | ۱۰- هوستن       | ۱۸- فیلادلفیا     |
| ۳- بوستون         | ۱۱- کانزاس سیتی | ۱۹- فینیکس        |
| ۴- شیکاگو         | ۱۲- لس آنجلس    | ۲۰- پیتسبرگ       |
| ۵- سینسیتی        | ۱۳- ممفیس       | ۲۱- سنت لوئیس     |
| ۶- کلرلند         | ۱۴- میامی       | ۲۲- سان فرانسیسکو |
| ۷- دالاس فورت ورت | ۱۵- مینیاپولیس  | ۲۳- سیاتل         |
| ۸- دنور           | ۱۶- نیو ارلان   | ۲۴- تپا           |
|                   |                 | ۲۵- واشینگتن      |

شکل ۳. مجموعه‌ی داده‌ی CAB.

$$\sum_{v' \in V'} Z_{ik}^{(v')} t^{v'} + \sum_{v \in V} \sum_{l \in N} Y_{lk}^{(i,v)} t^v = \sum_{v \in V} \sum_{l \in N} Y_{kl}^{(i,v)} t^v + \sum_{v' \in V'} \sum_{j \in N} X_{kj}^{(i,v')} t^{v'} \quad \forall i, k \in N, \quad (35)$$

$$\sum_{v' \in V'} Z_{ik}^{(v')} t^{v'} \leq \sum_{j \in N} W_{ij} H_k \quad \forall i, k \in N, \quad (36)$$

$$\sum_{v' \in V'} \sum_{i \in N} X_{lj}^{(i,v')} t^v \leq \sum_{i \in N} W_{ij} H_l \quad \forall l, j \in N, \quad (37)$$

$$\lambda_k^{(v, position)} = \sum_{\forall s_k \in S_k} \lambda_{s_k}^{(v, position)} \quad \forall k, v, position, \quad (38)$$

$$\lambda_k^{(v', position)} = \sum_{\forall s_k \in S_k} \lambda_{s_k}^{(v', position)} \quad \forall k, v', position, \quad (39)$$

$$\lambda_{s_k}^{position} = \sum_{\forall v \in V} \lambda_{s_k}^{(v, position)} + \sum_{\forall v' \in V'} \lambda_{s_k}^{(v', position)} \quad \forall k, s_k, position, \quad (40)$$

$$\lambda_{s_k}^{position} \leq \lambda_{s_k}^{position \max} \quad \forall k, s_k, \quad (41)$$

$$\lambda_{s_k}^{(r_{s_k}, position)} = 0 \quad \forall k, s_k, position, r_{s_k}, \quad (42)$$

$$X_{lj}^{(i,v')}, Y_{kl}^{(i,v)}, Z_{ik}^{(v')} \geq 0 \quad \forall i, l, j, k, \quad (43)$$

$$\lambda_k^{(v', landing)}, \lambda_k^{(v, landing)}, \lambda_k^{(v', takeoff)}, \lambda_k^{(v, takeoff)}, \lambda_{s_k}^{(v, position)}, \lambda_{s_k}^{(v', position)} \geq 0 \quad \forall i, l, j, k. \quad (44)$$

معادله‌ی ۳۸ بیان می‌کند که مجموع نرخ ورود هواپیماهای سنگین هم‌نوع خواهند نشست (یا برخاست) در باندهای یک فرودگاه برابر با نرخ ورود همان نوع هواپیما خواهند نشست است. معادله‌ی ۳۹ نشان می‌دهد که مجموع نرخ ورود هواپیماهای بزرگ هم‌نوع خواهند نشست (یا برخاست) در باندهای یک فرودگاه برابر با نرخ ورود آن نوع هواپیمای خواهند نشست (یا برخاست) به آن گره است. معادله‌ی ۴۰ بیان می‌کند که مجموع نرخ ورود تمامی انواع هواپیماهای خواهند نشست (یا برخاست) به یک باند برابر با نرخ ورود هواپیماهای خواهند نشست (یا برخاست) به آن باند است. معادله‌ی ۴۱ تضمین می‌کند که نرخ ورود هواپیماهای خواهند نشست (یا برخاست) در یک باند از ظرفیت آن باند برای عملیات نشست (یا برخاست) بیشتر نشود. معادله‌ی ۴۲ اطمینان می‌دهد که انواع هواپیمایی که اجازه‌ی انجام عملیات (نشست یا برخاست) از یک باند را ندارند، به آن باند وارد نشوند. توضیحات روابط ۳۳ تا ۳۷ به ترتیب مشابه روابط ۱۰ تا ۱۴ است.

از حل مدل مذکور نحوه‌ی تخصیص عملیات نشست و برخاست هر یک از انواع هواپیماها به هر یک از باندها به وسیله‌ی متغیرهای تصمیم  $\lambda_{s_k}^{(v, position)}$  و  $\lambda_{s_k}^{(v', position)}$  مشخص می‌شود. شایان ذکر است که با حذف عبارت  $\sum_k F_k H_k$  از تابع هدف هزینه، و حذف توابع هدف دیگر و اضافه کردن رابطه‌ی  $\sum_k H_k = p$  به مجموعه‌ی محدودیت‌ها مدل چندهدفه‌ی  $CMAHLMOP - R$  به مدل تک‌هدفه‌ی  $CMApHMP - R$  (مسئله‌ی دگرگون‌شده‌ی تک هدفی میانه‌ی پی-هاب با تخصیص چندگانه و با محدودیت ظرفیت) تبدیل می‌شود. محدودیت  $\sum_k H_k = p$  تضمین می‌کند که تعداد مشخص  $p$  هاب مکان‌یابی شوند. با



- $f_5$ : میزان کل آلودگی CO برحسب تن؛
- $f_6$ : میزان کل آلودگی CO<sub>2</sub> برحسب تن؛
- $f_7$ : میزان کل آلودگی SO<sub>2</sub> برحسب تن؛
- $f_8$ : مجموع میزان مصرف سوخت برحسب تن.

## ۷. تعادل بار ترافیک در هاب‌های شبکه

در این بخش جواب‌های بهینه‌ی دو مدل CMApHMP-R و UMApHMP-R از لحاظ تعادل ترافیک در شبکه با هم مقایسه می‌شوند. تعداد هاب‌ها ( $p$ ) برابر ۶، هزینه ثابت احداث هر هاب برابر یک میلیون دلار و ضرایب تخفیف در بخش انتقال ( $\alpha$ ) برابر ۰٫۳، ۰٫۳، ۰٫۳، ۰٫۳ و ۰٫۳ در نظر گرفته شده‌است. نتایج حاصل از حل بهینه با نرم‌افزار GAMS الگوریتم بهینه‌ساز CPLEX در جداول ۲ تا ۴ منعکس شده‌است. در جدول ۲ هزینه و هاب‌های بهینه، و در جدول‌های ۳ و ۴ تعداد کل هواپیماهای وارد شده به هر یک از هاب‌ها (ترافیک در هر یک از هاب‌ها،  $\lambda_h$ ) و شاخص تعادل بار ترافیک در هاب‌های شبکه ( $W_B$ ) حاصل از بهینه‌سازی مدل‌های CMApHMP-R و UMApHMP-R ارائه شده‌است. متغیر  $\lambda_h$  و شاخص  $W_B$  چنین محاسبه می‌شوند:

$$\lambda_h = \sum_v \sum_{position} \lambda_h^{(v, position)} + \sum_{v'} \sum_{position} \lambda_h^{(v', position)} \quad (45)$$

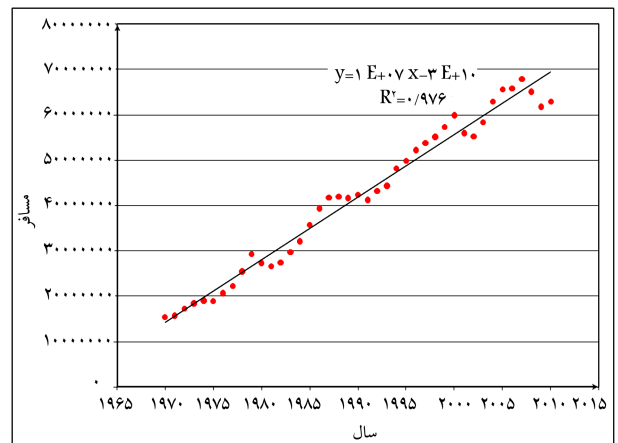
$$\bar{\lambda}_{HUB} = \frac{\sum_h \lambda_h}{p} \quad (46)$$

$$W_B = \frac{\sum_h |\lambda_h - \bar{\lambda}_{HUB}|}{p} \quad (47)$$

$h$  اندیس مربوط به نقاط هاب است.

رابطه‌ی ۴۷ بیانگر شاخص  $W_B$ ، متوسط پراکندگی ترافیک هاب‌ها از مقدار میانگین آن است. هرچه این شاخص کم‌تر باشد تعادل بیشتری در هاب‌های شبکه برقرار است.

از مقایسه‌ی جدول ۲ با جدول ۳ و ۴ موازنه‌ی هزینه‌ی حمل‌ونقل در برابر تعادل بار ترافیک در هاب‌ها به روشنی مشاهده می‌شود. مطابق جدول ۲ هزینه‌ی حمل‌ونقل بهینه (مقدار تابع هدف) در مدل UMApHMP-R به علت نداشتن محدودیت ظرفیت بین ۰٫۱۹ تا ۱۶٫۶۶ درصد از مدل CMApHMP-R کم‌تر است ولی مطابق جدول‌های ۳ و ۴ تعادل کم‌تری در شبکه‌ی حاصل از UMApHMP-R



شکل ۴. نمودار کل جریان سالانه‌ی مسافران داخلی آمریکا از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰.

فرودگاه‌های شهرهای مختلف در ساعت اوج ماه جولای از وب سایت weather underground<sup>۲۸</sup> اخذ شد.

باند‌های فعال فرودگاه‌های کشور آمریکا به همراه نرخ خدمت آن‌ها در هر یک از طبقات آب‌وهوایی VFR، MVFR و IFR در سال ۲۰۰۴ از سایت سازمان هوانوردی فدرال (FAA) گرفته شد. طول باند‌های فرودگاه‌های مختلف نیز از طریق اینترنت دریافت شد.<sup>۲۹</sup> با توجه به لحاظ کردن تنوع هواپیماها به عنوان عامل تأثیرگذار در طراحی شبکه، سه نوع هواپیمای بزرگ برای پرواز در جزء ادغام و توزیع به نام‌های ۲۰۰-۳۲۰، ۴۰۰-۳۳۷، و MDA۲ هر یک به تعداد ۲۷۵ فروند ( $y^{v'} : y^{v'} = 275$ )، و سه نوع هواپیمای سنگین برای پرواز در جزء انتقال به نام‌های ۲۰۰-۳۳۷، ۲۰۰-۳۳۷، و ۲۰۰-۳۳۷ هر یک به تعداد ۱۰۰ فروند ( $y^v : y^v = 100$ ) در نظر گرفته شد.<sup>۳۰</sup> مابقی داده‌های مربوط به هواپیماها از سایت کارخانه‌های سازنده آن‌ها دریافت شد. مشخصات هواپیماهای مذکور در جدول ۱ گزارش شده‌است.

برای تابع هدف مربوط به سروصدا در مدل نهایی فقط کلان‌شهر نیویورک ملاک قرار داده شد. در مدل چندهدفه‌ی پیشنهادی هدف‌های زیر در نظر گرفته شده‌است:

$f_1$ : مجموع هزینه‌ها (هزینه‌ی حمل‌ونقل و احداث شبکه)؛

$f_2$ : شدت سروصدا در کلان‌شهر نیویورک برحسب دسی‌بل وزن‌دار؛

$f_3$ : میزان کل آلودگی VOC برحسب تن؛

$f_4$ : میزان کل آلودگی NO<sub>x</sub> برحسب تن؛

جدول ۱. مشخصات هواپیماهای مورد نظر.

کارخانه‌ی سازنده	مدل هواپیما	نوع هواپیما	ظرفیت (برحسب مسافر)	طول باند لازم (فوت)	حداکثر سرعت باد پهلوی مجاز (km/h)	SEL <sup>[۲۹]</sup> (dBA)		هزینه‌ی پرواز <sup>[۳۰]</sup> (\$/mile)
						نشست	برخاست	
Airbus	۲۰۰ - A۳۲۰	بزرگ (L)	۱۵۰	۵۶۳۰	۳۰	۸۴٫۲	۸۸٫۴	۱۳٫۵۳۴
Boeing	۴۰۰ - B۷۳۷	بزرگ (L)	۱۴۷	۷۳۰۰	۳۰	۸۵	۸۷٫۶	۱۶٫۵۷۳
McDonnell Douglas	MD ۸۲	بزرگ (L)	۱۴۳	۷۵۵۰	۳۰	۸۱٫۷	۸۶٫۶	۱۶٫۸۷۳
Boeing	۲۰۰-ER - B۷۶۷	سنگین (H)	۱۸۱	۶۰۰۰	۳۷	۸۷٫۴	۸۹٫۳	۲۲٫۸۴۹
Boeing	۳۰۰-ER - B۷۶۷	سنگین (H)	۲۱۸	۸۰۰۰	۳۷	۸۷٫۴	۸۹٫۳	۲۳٫۸۲۶
Boeing	۲۰۰ - B۷۵۷	سنگین (H)	۲۰۰	۵۸۰۰	۳۷	۸۴٫۶	۸۵٫۳	۱۹٫۵۸۷

جدول ۲. مقایسه‌ی جواب‌های بهینه‌ی مدل‌های CMApHMP-R و UMAPHMP-R از لحاظ مکان هاب‌ها و هزینه‌ی حمل‌ونقل.

$\alpha$	UMApHMP-R		CMApHMP-R		درصد تفاوت هزینه‌های حمل‌ونقل $\left(\frac{f_{\text{CMApHMP-R}}^* - f_{\text{UMApHMP-R}}^*}{f_{\text{UMApHMP-R}}^*}\right) \times 100$
	هزینه‌ی حمل‌ونقل	مکان هاب‌ها	هزینه‌ی حمل‌ونقل	مکان هاب‌ها	
۰	۱۰۳۴۸۱۷۷,۳۹	۲۲, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۴, ۱	۱۲۰۷۲۶۹۵,۳۹	۲۵, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۷, ۴	۱۶,۶۶
۰٫۳	۱۲۳۴۹۶۲۱,۵۳	۲۲, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۴, ۱	۱۳۴۶۳۳۷۲,۷۴	۱۷, ۱۴, ۱۲, ۹, ۷, ۴	۹,۰۲
۰٫۶	۱۴۱۸۱۴۸۹,۷۸	۲۲, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۴, ۱	۱۵۳۹۶۹۵۴,۳۹	۱۷, ۱۴, ۱۲, ۷, ۶, ۴	۸,۵۷
۰٫۹	۱۵۴۵۳۰۷۴,۲۷	۲۵, ۲۲, ۱۷, ۱۲, ۴, ۱	۱۵۴۸۲۰۳۷,۳۷	۲۵, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۷, ۴	۰٫۱۹

جدول ۳. تعادل ترافیک در هاب‌ها در مدل UMAPHMP-R.

$\alpha$	(هاب ۱ و ۱ $\lambda_{hub1}$ )	(هاب ۲ و ۲ $\lambda_{hub2}$ )	(هاب ۳ و ۳ $\lambda_{hub3}$ )	(هاب ۴ و ۴ $\lambda_{hub4}$ )	(هاب ۵ و ۵ $\lambda_{hub5}$ )	(هاب ۶ و ۶ $\lambda_{hub6}$ )	$W_B$
۰	(۱۳۷,۷۱۹, ۱)	(۳۱۷,۸۷۳, ۴)	(۱۱۵,۳۵۷, ۱۲)	(۸۰,۱۰۱, ۱۴)	(۴۳۸,۵۷۲, ۱۷)	(۷۹,۹۷۷, ۲۲)	۲۰,۱۲,۱۹
۰٫۳	(۱۴۱,۶۱۵, ۱)	(۳۴۲,۳۹۶, ۴)	(۱۰۴,۳۹, ۱۲)	(۷۷,۶۵۸, ۱۴)	(۴۲۱,۴۶, ۱۷)	(۸۲,۰۸, ۲۲)	۱۲۴,۶۶
۰٫۶	(۱۵۷,۹۳۵, ۱)	(۳۴۴,۵۸۱, ۴)	(۹۳,۸۲۸, ۱۲)	(۶۱,۱۹۹, ۱۴)	(۳۹۹,۵۴۱, ۱۷)	(۶۲,۲۴۱, ۲۲)	۱۲۳,۶۷
۰٫۹	(۱۲۲,۶۴۳, ۱)	(۲۳۸,۰۵۶, ۴)	(۹۰,۴۷۲, ۱۲)	(۲۹۲,۷۸, ۱۷)	(۶۰,۹۴۱, ۲۲)	(۱۸۰,۲۱۶, ۲۵)	۷۲,۸۳

جدول ۴. تعادل ترافیک در هاب‌ها در مدل CMApHMP-R.

$\alpha$	(هاب ۱ و ۱ $\lambda_{hub1}$ )	(هاب ۲ و ۲ $\lambda_{hub2}$ )	(هاب ۳ و ۳ $\lambda_{hub3}$ )	(هاب ۴ و ۴ $\lambda_{hub4}$ )	(هاب ۵ و ۵ $\lambda_{hub5}$ )	(هاب ۶ و ۶ $\lambda_{hub6}$ )	$W_B$
۰	(۱۹۴,۳۲۷, ۴)	(۲۵۰,۹۸, ۷)	(۱۱۸,۵۲, ۱۲)	(۷۸,۱۶, ۱۴)	(۲۳۸,۴۳, ۱۷)	(۱۳۳,۰۴۱, ۲۵)	۵۹,۰۰
۰٫۳	(۱۹۶,۲۷۶, ۴)	(۲۵۰,۹۸, ۷)	(۱۴۱,۰۶۸, ۹)	(۱۱۸,۵۲, ۱۲)	(۷۴,۶۹۲, ۱۴)	(۲۳۸,۴۳, ۱۷)	۵۸,۵۷
۰٫۶	(۱۹۰,۶۷, ۴)	(۶۴,۲۴, ۶)	(۲۵۰,۹۸, ۷)	(۱۱۸,۵۲, ۱۲)	(۷۳,۶۲۹, ۱۴)	(۲۳۸,۴۳, ۱۷)	۷۰,۶۲
۰٫۹	(۱۸۹,۶۴۱, ۴)	(۱۸۸,۹۱۲, ۷)	(۱۱۸,۵۲, ۱۲)	(۷۳,۳۲۴, ۱۴)	(۲۳۶,۹۹۴, ۱۷)	(۱۲۸,۳۹۳, ۲۵)	۴۹,۲۲

برقرار است و همواره سه عدد از هاب‌ها با ازدحام بیشتر و سایر هاب‌ها با بهره‌وری کم‌تر روبه‌رو هستند. جواب‌های بهینه‌ی مدل CMApHMP-R (با هزینه‌ی حمل‌ونقل کمی بالاتر ولی تعادل ترافیک بیشتر در هاب‌ها) تضمین می‌کند که به احتمال حداقل ۹۵٪ تعداد بیش از دو هواپیما در هر لحظه روی هر یک از باند‌های فرودگاه‌های هاب منتظر عملیات نیستند و متوسط زمان انتظار برای عملیات نشست یا برخاست هواپیماها روی هر باند از ۵ دقیقه بیشتر نمی‌شود. نتایج حاصل، نشان‌گر کارایی مدل‌های فرعی برای برآورد ظرفیت در راستای کاهش ازدحام در هاب‌های شلوغ است. در حقیقت مدل CMApHMP-R ترافیک در هاب‌ها را متعادل‌تر توزیع کرده، میزان بهره‌وری هاب‌های بیکار را افزایش و میزان ازدحام در هاب‌های شلوغ را کاهش می‌دهد.

برتر را انتخاب کرد. در این پژوهش از روش محدودیت -  $\epsilon$  به منظور ارائه‌ی جواب‌های کارا و از روش AHP گروهی برای انتخاب جواب برتر استفاده شد.

#### ۱.۸. شدنی بودن مسئله (نا تهی بودن فضای جواب)

یکی از تکنیک‌های متداول در بررسی شدنی بودن یک مسئله استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی  $\alpha^1$  است:

$$\min \{f_j(x), j = 1, 2, \dots, k\}$$

S.t.

$$g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (48)$$

برای بررسی فضای جواب مطابق رابطه‌ی ۴۹ هر یک از محدودیت‌ها با اضافه شدن انحرافات مثبت و منفی به شکل معادله درمی‌آیند و تمامی توابع هدف  $f_j(x)$  حذف و تابع هدف دیگری به صورت مجموع انحرافات مثبت و منفی در مدل قرار می‌گیرد.

$$\min \sum_{i=1}^m d_i^- + d_i^+$$

S.t.

$$g_i(x) + d_i^- - d_i^+ = b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (49)$$

#### ۸. حل مدل چندهدفه‌ی نهایی (CMAHLMOP-R)

اولین گام در حل یک مسئله‌ی چندهدفه‌ی شدنی، بررسی جواب‌های بهینه‌ی حاصل از حل مسائل تک‌هدفه‌ی هر یک از توابع هدف با توجه به فضای شدنی مسئله‌ی چندهدفه است. چنانچه این جواب‌ها یکسان باشد، جواب به دست آمده جواب بهینه‌ی مسئله‌ی چندهدفه است. در غیر این صورت می‌توان با روش‌های MODM جواب‌های کارا را به دست آورد و سپس به کمک یکی از روش‌های MADM جواب

جدول ۵. حل بهینه‌ی مسائل تک‌هدفه.

مکان‌ها	مقدار تابع هدف	تابع هدف
۲۵, ۲۳, ۱۷, ۱۴, ۱۲, ۷, ۴	۱۴۴۱۶۲۶۳,۴۲	$f_1$
۲۵, ۱۹, ۱۸, ۱۵, ۱۳, ۱۱, ۷, ۴	۷۳,۰۵	$f_2$
۲۵, ۲۱ - ۱۹, ۱۵ - ۱۳, ۱۱, ۹ - ۱	۱,۹۸	$f_3$
۲۵ - ۲۲, ۲۰, ۱۹, ۱۶, ۱۴, ۱۳, ۸ - ۶, ۴, ۳, ۱	۵۳,۴۳	$f_4$
۲۵, ۲۳, ۲۰, ۱۹, ۱۷ - ۱۳, ۱۱ - ۷, ۳	۱۷,۲۹	$f_5$
۲۳, ۲۲, ۱۹ - ۱۷, ۱۴, ۱۱, ۱۰, ۷, ۴	۱۳۸۹۹,۹۴	$f_6$
۲۵ - ۲۳, ۲۱ - ۱۸, ۱۶ - ۶, ۳ - ۱	۴,۳۸	$f_7$
۲۵, ۲۴, ۲۲ - ۲۰, ۱۸, ۱۷, ۱۵, ۱۴, ۱۱ - ۷	۴۳۲۳,۶۷	$f_8$

جواب‌های کارای گوناگون در بخش‌های مختلف فضای جواب است.<sup>[۳۱]</sup> ثابت شده است که جواب منحصر به فرد حاصل از این روش، جواب کاراست.<sup>[۳۲]</sup> شایان ذکر است که در این روش نظر DM بعد از حل اعمال می‌شود.

در این روش از بین  $k$  تابع هدف موجود یکی از اهداف برای کمیته شدن انتخاب و  $(k-1)$  هدف دیگر به شکل  $f_j(x) \leq \varepsilon_j$  به محدودیت‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی اضافه می‌شود.  $\varepsilon_j$  پارامتری است که حد بالای مقدار تابع هدف  $f_j$  را مشخص می‌کند. با فرض انتخاب تابع هدف  $f_i$  (برای کمیته شدن، مدل به شکل رابطه‌ی ۵۱ درمی‌آید:

$$\begin{aligned} \min f_i(x) \\ \text{S.t.} \\ g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ f_j(x) \leq \varepsilon_j \quad j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, k \end{aligned} \quad (51)$$

با تغییر  $\varepsilon_j$  می‌توان به جواب‌های کارای مختلف رسید. سرانجام پس از به دست آوردن تعدادی جواب کارا، DM جواب مرجع<sup>۳۳</sup> (برتر) را از بین جواب‌های کارای یافت شده انتخاب می‌کند. این انتخاب معمولاً براساس وزن اهداف مختلف از نظر DM و براساس روش‌های MADM انجام می‌شود. از ضعف‌های روش محدودیت  $\varepsilon$  می‌توان به ابهام در انتخاب مقادیر هر یک از  $\varepsilon_j$ ‌ها اشاره کرد. همچنین دنبال کردن جواب کارای رأسی در این روش آسان نیست.

#### ۵.۸. اجرای روش محدودیت - $\varepsilon$

در اینجا تابع هدف اول ( $f_1$ ) یعنی مجموع هزینه‌ها برای کمیته شدن انتخاب و مابقی توابع هدف به محدودیت برده شدند. با استفاده از نرم‌افزار GAMS الگوریتم بهینه‌سازی

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
$f_1$	۱۴۴۱۶۲۶۳,۴۲	۷۵,۰۴	۳,۷۴۳	۶۶,۳۸	۲۱,۹۸	۱۵۳۹۷,۱۷	۴,۸۷	۴۸۸۷,۹۷
$f_2$	$۲,۹۱۲۶ \times ۱۰^۷$	۷۳,۰۵	۲,۸۷	۶۱,۷۳	۲۷,۱۲	۱۴۹۴۵,۷۳	۴,۸۷	۵۱۶۹,۴۷
$f_3$	$۲,۶۴۱۲ \times ۱۰^۷$	۷۴,۷۳	۱,۹۸	۵۶,۶۵	۲۳,۷۴	۱۴۸۵۴,۴۵	۴,۶۹	۴۷۱۵,۷۲
$f_4$	$۲,۳۶۲۹ \times ۱۰^۷$	۷۴,۵۷	۲,۴۳	۵۳,۴۳	۲۳,۱۹	۱۳۹۰,۱۰۰	۴,۳۹	۴۴۱۲,۴۰
$f_5$	$۲,۴۱۰۴ \times ۱۰^۷$	۷۴,۷۳	۳,۵۶	۶۲,۹۰	۱۷,۲۹	۱۵۸۶۴,۱۱	۵,۰۳	۵۰۳۶,۱۴
$f_6$	$۱,۸۲۹۱ \times ۱۰^۷$	۷۴,۳۱	۳,۵۹	۵۹,۴۷	۲۶,۶۵	۱۳۸۹۹,۹۴	۴,۴۱	۴۴۱۲,۷۵
$f_7$	$۲,۸۲۲۶ \times ۱۰^۷$	۷۴,۷۳	۳,۷۳	۶۰,۷۸	۲۸,۵۴	۱۳۹۰۰,۸۹	۴,۳۸	۴۳۸۱,۹۵
$f_8$	$۲,۱۵۳۷ \times ۱۰^۷$	۷۴,۴۴	۳,۶۱	۵۹,۳۴	۲۸,۰۸	۱۳۹۱۹,۳۱	۴,۴۲	۴۳۲۳,۶۷

چنانچه ارزش تابع هدف از حل بهینه‌ی مدل برابر صفر باشد فضای جواب ناتهی و مسئله شدنی، و در غیر این صورت نشدنی است.

#### ۲.۸. تحلیل هدف‌ها

برای فهم این‌که آیا  $k$  تابع هدف مدل با رابطه‌ی ۴۸ جهت‌گیری‌های بهینه‌ی یکسانی دارند یا خیر،  $k$  مسئله‌ی تک‌هدفه‌ی حاصل از در نظر گرفتن یک‌یک توابع هدف را به‌طور جداگانه به‌صورت رابطه‌ی ۵۰ حل می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \forall j : \min f_j(x) \\ \text{S.t.} \\ g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (50)$$

چنانچه حل بهینه‌ی  $k$  مسئله‌ی فوق یکسان باشد، توابع هدف جهت‌گیری بهینه‌ی کاملاً یکسانی دارند و جواب حاصل، راه‌حل بهینه‌ی مسئله‌ی چندهدفه است. در غیراین صورت باید با استفاده از روش‌های MODM به حل مسئله پرداخت.

#### ۳.۸. اجرای شدنی بودن مسئله و تحلیل هدف‌ها

با استفاده از نرم‌افزار GAMS الگوریتم بهینه‌ساز CPLEX فضای شدنی مسئله مورد بررسی قرار گرفت. ضریب تخفیف بخش انتقال ( $\alpha$ ) برابر ۰/۵ و هزینه‌ی ثابت احداث هر هاب یک میلیون دلار فرض شد. صفر شدن ارزش تابع هدف مسئله با رابطه‌ی ۴۹ دلیل بر ناتهی بودن فضای جواب بود.

در مدل چندهدفه‌ی نهایی، تابع هدف اول هزینه برحسب واحد پول، تابع هدف دوم شدت سروصدا برحسب دسی‌بل وزن‌دار، توابع هدف سوم تا هفتم به ترتیب جرم آلاینده‌های VOC،  $\text{CO}$ ،  $\text{NO}_x$ ،  $\text{CO}_2$  و  $\text{SO}_2$  خروجی از هواپیماها برحسب تن و تابع هدف هشتم جرم سوخت مصرفی برحسب تن است. بنابراین هر یک از هدف‌ها دارای مقیاس و واحد مخصوص به خود بوده و یکپارچه‌کردن آن مشکل است. نتایج مربوط به حل بهینه‌ی مسائل تک‌هدفه مطابق رابطه‌ی ۵۰ در جدول ۵ گزارش شده است. ماتریس بهره‌وری<sup>۳۲</sup> نیز در ادامه تشکیل شده است.

چنان که در جدول ۵ و ماتریس بهره‌وری مشخص است، حل بهینه‌ی مسائل تک‌هدفه یکسان نیست، پس مسئله دارای یک راه‌حل بهینه نیست و باید از روش‌های MODM استفاده کرد.

#### ۴.۸. روش محدودیت - $\varepsilon$

در این پژوهش از روش محدودیت -  $\varepsilon$  استفاده شد. از جمله مزیت‌های این روش سادگی، امکان استفاده در مسائل با فضای هدف محدب و نامحدب، و توانایی تولید

جدول ۶. انتخاب مقادیر مختلف برای  $\varepsilon_j$  ها.

جواب کارآ	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon_4$	$\varepsilon_5$	$\varepsilon_6$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_8$
۱	۴۷۰۰	۴,۷	۱۵۰۰۰	۲۰	۶۰	۳,۴	۷۵	
۲	۴۵۰۰	۴,۹	۱۴۵۰۰	۲۲	۵۹	۲,۹	۷۴	
۳	۴۶۰۰	۴,۵	۱۴۳۰۰	۲۱	۶۱	۳,۳	۷۵	
۴	۴۸۰۰	۴,۸	۱۵۳۰۰	۲۰	۶۲	۳,۴	۷۴,۵	
۵	۴۵۵۰	۴,۶	۱۴۴۰۰	۲۱	۶۰	۳	۷۴,۵	
۶	۴۷۰۰	۴,۵	۱۴۶۰۰	۲۱	۶۳	۳	۷۵	
۷	۴۹۰۰	۴,۶	۱۴۴۰۰	۲۲	۶۱	۲,۸	۷۴	
۸	۴۷۰۰	۴,۶	۱۴۶۰۰	۲۱	۶۰	۲,۹	۷۵	
۹	۴۵۰۰	۴,۵	۱۴۲۰۰	۲۱	۶۶	۴	۷۵	
۱۰	۴۶۰۰	۵	۱۴۴۰۰	۲۰	۶۱	۳,۲	۷۴,۵	

$$n_{ij} = \frac{\max_i r_{ij} - r_{ij}}{\max_i r_{ij} - \min_i r_{ij}} \quad (52)$$

که در آن  $n_{ij}$  درایه‌ی نرمال شده‌ی  $r_{ij}$  است.

به منظور انتخاب راه‌حل برتر ساختار سلسله‌مراتبی مطابق شکل ۵ را در نظر گرفته و از AHP گروهی استفاده شد. ده نفر از خبرگان این حوزه از محققین دانشکده‌ی هوانوردی و فضاوردی دانشگاه MIT و نیز اداره‌ی محیط‌زیست و انرژی سازمان هوانوردی فدرال آمریکا ماتریس مقایسات زوجی اهمیت معیارها نسبت به طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی را تهیه کردند. با فرض اهمیت یکسان نظرات و با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice، ماتریس‌های مذکور یک پارچه و در نهایت ماتریس اوزان شاخص‌ها به دست آورده شد. این ماتریس در زیر شکل ۵ قابل مشاهده است. با ضرب ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس شده در ماتریس اوزان شاخص‌ها ماتریس زیر شکل ۶ نتیجه می‌شود. با توجه به این ماتریس نهایی جواب کارآی دوم به عنوان راه‌حل برتر انتخاب می‌شود. شکل ۶ شبکه‌ی هاب‌وگمان حاصل از جواب برتر انتخاب شده را نشان می‌دهد. اعداد بنفش‌رنگ در کنار گره‌های غیرهاب نشان می‌دهد که به چه هاب‌هایی متصل شده‌اند.

## ۹. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی برای حل مشکل ازدحام در فرودگاه‌های هاب ارائه شد. بدین منظور سیستم صف به صورت صف‌های مجزا برای هر باند برمیبنای سیستم  $M/G/1$  تعریف، و مدل‌های فرعی سه‌گانه برای به دست آوردن ظرفیت ورودی بهینه‌ی هواپیماها به باندهای نشست، برخاست و ترکیبی ارائه شد. نتایج حاصله نشان داد که جواب بهینه‌ی مدل با محدودیت ظرفیت (CMaPHMP-R) در مقایسه با مدل بدون محدودیت ظرفیت (UMaPHMP-R) بار ترافیک در هاب‌های شبکه را به صورت متعادل‌تری برقرار می‌کند. این نتیجه کارایی مدل‌های فرعی برای برآورد

CPLEX با انتخاب مقادیر  $\varepsilon_j$  مختلف مطابق جدول ۶ جواب کارآی مختلف به دست آورده شد. نتایج حاصل از حل در جدول ۷ منعکس شده است.

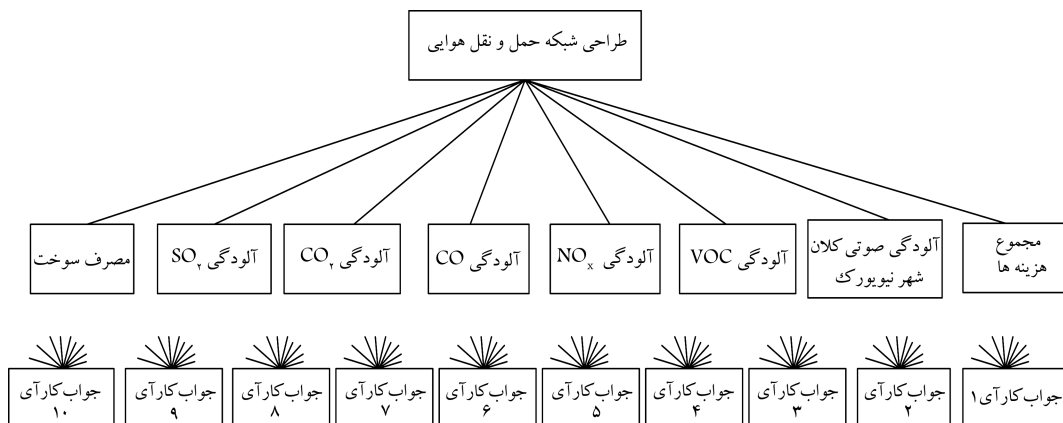
جدول ۷ به مانند یک ماتریس تصمیم‌گیری است که سطرهاى آن نشان‌گر گزینه‌ها و ستون‌های آن نشان‌گر شاخص‌های مختلف است. بعد از حل، معیار تعادل ترافیک در هاب‌های شبکه ( $WB$ ) نیز به مجموعه‌ی شاخص‌ها اضافه شد. هر یک از درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری فوق  $r_{ij}$  نامیده شد. روش بی‌مقیاس‌سازی فازی مطابق رابطه‌ی ۵۲ روی این ماتریس اعمال شد. مقیاس اندازه‌گیری در این بی‌مقیاس‌سازی بین صفر و ۱ است به طوری که صفر برای بدترین و ۱ برای بهترین

جدول ۷. جواب کارآی به دست آمده از روش محدودیت - ۵.

جواب کارآ	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$WB$
۱	۱۴۵۷۳۶۳۱,۶۳	۷۴,۵۱	۳,۳۸	۶۰	۲۰	۱۴۴۱۰,۲۶	۴,۵۶	۴۵۷۴,۶۶	۴۷,۳۴	
۲	۱۴۵۵۱۴۲۰,۵۹	۷۴	۲,۸۹	۵۸,۷۲	۲۲	۱۴۱۷۴,۹۹	۴,۴۸	۴۵۰۰	۴۷,۱۲	
۳	۱۴۸۹۶۸۴۴,۳۰	۷۴,۶۷	۳,۲۸	۶۰,۱۲	۲۱	۱۴۲۲۳,۴۲	۴,۵	۴۵۱۵,۳۶	۴۳,۶۲	
۴	۱۴۹۱۵۷۹۲,۱۱	۷۴,۵۰	۳,۴	۶۲	۲۰	۱۴۶۴۴,۹۲	۴,۶۴	۴۶۴۹,۱۵	۴۲,۷۰	
۵	۱۵۰۷۵۳۱۲,۴۰	۷۴,۵۰	۳	۵۹,۹۳	۲۱	۱۴۳۲۲,۵۴	۴,۵۳	۴۵۵۰	۴۳,۸۱	
۶	۱۵۰۸۹۷۳۵,۵۴	۷۴,۸۰	۳	۵۹,۵۶	۲۱	۱۴۲۳۳,۷۴	۴,۵	۴۵۱۸,۶۴	۴۶,۲۶	
۷	۱۵۰۰۳۷۱۸,۸۹	۷۴	۲,۸۰	۶۰,۱۷	۲۲	۱۴۴۰۰	۴,۵۵	۴۵۷۱,۴۳	۳۹,۱۱	
۸	۱۴۵۵۴۳۹۰,۶۲	۷۴,۸۲	۲,۹	۶۰	۲۱	۱۴۴۸۸,۴۲	۴,۵۸	۴۵۹۹,۴۹	۴۶,۷۸	
۹	۱۴۹۳۷۹۲۸,۳۳	۷۴,۶۷	۳,۲۵	۵۹,۸۱	۲۱	۱۴۱۷۵,۰۵	۴,۴۹	۴۵۰۰	۴۴,۳۰	
۱۰	۱۵۱۳۰۱۰۰,۲۷	۷۴,۵۰	۳,۲	۶۰,۴۲	۲۰	۱۴۴۰۰	۴,۵۶	۴۵۷۱,۴۰	۴۵,۷۶	

جدول ۸. ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس شده.

جواب کارآ	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$W_B$
۱	۰٫۹۶	۰٫۳۸	۰٫۰۳	۰٫۶۱	۱	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰
۲	۱	۱	۰٫۸۵	۱	۰	۱	۱	۱	۰٫۰۳
۳	۰٫۴	۰٫۱۸	۰٫۲	۰٫۵۷	۰٫۵	۰٫۹	۰٫۸۸	۰٫۹	۰٫۴۵
۴	۰٫۳۷	۰٫۳۹	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰٫۵۶
۵	۰٫۰۹	۰٫۳۹	۰٫۶۷	۰٫۶۳	۰٫۵	۰٫۶۶	۰٫۶۹	۰٫۶۶	۰٫۴۳
۶	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۶۷	۰٫۷۴	۰٫۵	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۸	۰٫۱۳
۷	۰٫۲۲	۱	۱	۰٫۵۶	۰	۰٫۵۲	۰٫۵۶	۰٫۵۲	۱
۸	۰٫۹۹	۰	۰٫۸۳	۰٫۶۱	۰٫۵	۰٫۳۳	۰٫۳۷	۰٫۳۳	۰٫۰۷
۹	۰٫۳۳	۰٫۱۸	۰٫۲۵	۰٫۶۷	۰٫۵	۰٫۹۴	۱	۱	۰٫۳۷
۱۰	۰	۰٫۳۹	۰٫۳۳	۰٫۴۸	۱	۰٫۵۲	۰٫۵	۰٫۵۲	۰٫۱۹

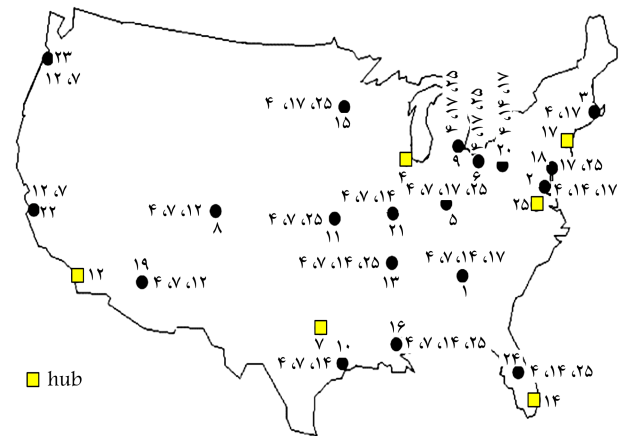


شکل ۵. ساختار سلسله‌مراتبی.

ظرفیت در راستای کاهش ازدحام در هاب‌های شلوغ و افزایش بهره‌وری هاب‌های بیکار را نشان می‌دهد.

در این پژوهش تنوع هواپیماها در طراحی شبکه‌ی هاب‌وگمان در نظر گرفته شد و بدین ترتیب مشکل طراحی شبکه براساس جریان مسافران و جریان هواپیما برطرف شد. از دیگر نوآوری‌های این پژوهش ارائه‌ی مدل چندهدفه با در نظر گرفتن معیارهایی چون آلودگی صوتی، آلودگی هوا و مصرف سوخت است. این پژوهش در پیچه‌ی جدیدی به نزدیکی مسائل مکان‌یابی هاب با چالش‌های واقعی زندگی انسان‌ها گشوده و برای اولین بار حوزه‌های سلامت و انرژی را وارد این مسائل می‌کند.

در ادامه‌ی این تحقیق و در راستای توسعه‌ی مدل‌های ارائه شده می‌توان به آزاد کردن فرض عدم وجود مسیرهای مستقیم بین گره‌های غیرهاب، لحاظ کردن توابع پلکانی برای ضریب تخفیف به‌جای ثابت بودن آن به‌ازای جریان‌های مختلف، و در نظر گرفتن هدف‌های دیگری چون زمان سفر و تعمیم مدل ارائه شده به حوزه‌ی غیر از حمل‌ونقل هوایی اشاره کرد.



شکل ۶. جواب مرجع.

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$W_B$
۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۴	۰٫۱۰

Sol i: جواب کارای نأم									
Sol ۱	Sol ۲	Sol ۳	Sol ۴	Sol ۵	Sol ۶	Sol ۷	Sol ۸	Sol ۹	Sol ۱۰
۰٫۵۰	۰٫۷۷	۰٫۵۹	۰٫۲۴	۰٫۵۵	۰٫۵۸	۰٫۵۸	۰٫۴۵	۰٫۶۲	۰٫۴۶

## پانوشتها

1. center for air transportation systems research  
۲. قابل دریافت از سایت:  
<http://catsr.ite.gmu.edu/pubs/AirlinePaxTripDelayReport2007.pdf>
3. multiple allocation p-Hub median problem (MApHMP)
4. uncapacitated single allocation p-Hub median problem
5. Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem
6. capacitated single allocation Hub location problem
7. capacitated multiple allocation Hub location problem
8. uncapacitated single allocation Hub location problem
9. uncapacitated multiple allocation Hub location problem
10. cross wind
11. prevailing wind
12. peak hour analysis
13. position
14. mixed integer programming
15. landing and takeoff
16. cruise
17. taxi-out
18. climb-out
19. approach-landing
20. taxi-in
21. climb
22. descent
23. European environment agency
24. sound exposure level
25. equivalent sound level
26. A-weighted decibel
۲۷. این مجموعه داده از آدرس اینترنتی:  
<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/files/phub4.txt>  
قابل دریافت است.
۲۸. برگرفته از آدرس اینترنتی:  
<http://www.wunderground.com/history/airport/>
۲۹. از نشانی اینترنتی:  
<http://www.aopa.org/asf/publications/taxi%>  
گرفته شد.
۳۰. داده‌های مربوط به SEL هریک از انواع هواپیماها از آدرس اینترنتی:  
<http://www.aircraftnoisemodel.org/index.php/login>  
قابل دریافت است.
31. goal programming
32. tradeoff matrix
33. preferred solution

## منابع (References)

1. De Neufville, R. and Odoni, A.R., *Airport Systems: Planning, Design, and Management*, McGraw-Hill, New York, USA (2003).
2. Center for Air Transportation Systems Research (CATSR), *Airline Passenger Trip Delay Report* (April 2008).
3. Mahashabde, A., and et al. "Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions", *Progress in Aerospace Sciences*, **47**, pp. 15-52 (2011).
4. Waitz, I., Townsend, J., Cutcher-Gershenfeld, J., Greitzer, E.M. and Kerrebrock, J.L. "Aviation and the environment: A national vision statement", *Framework for Goals and Recommended Actions* (December 2004).
5. US EPA, *Air Quality Criteria for Carbon Monoxide* (2000).
6. US EPA, *Air Quality Criteria for Particulate Matter* (2004).
7. US EPA, *Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen—Health Criteria* (2008).
8. US EPA, *Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides—Health Criteria* (2008).
9. EIA, *International Energy Outlook 2010* (July 2010).
10. EIA, *International Energy Outlook 2011* (September 2011).
11. Campbell, J.F. "Integer programming formulations of discrete hub location problem", *European Journal of Operation Research*, **72**, pp. 387-405 (1994).
12. Aykin, T. "Lagrangean relaxation based approaches to hub-and-spoke network design problem", *European Journal of Operation Research*, **79**(3), pp. 501-523 (1994).
13. Sasaki, M., Suzuki, A. and Drezner, Z. "On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke", *Computer and Operation Research*, **26**, pp. 1411-1422 (1999).
14. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem", *Location Science*, **4**(3), pp. 139-154 (1996).
15. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem", *European Journal of Operation Research*, **104**, pp. 100-122 (1998).
16. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Solution algorithm for the capacitated single allocation hub location problem", *Annals of Operation Research*, **86**, pp. 141-159 (1999).
17. Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A. and Boland, N. "The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms", *European Journal of Operation Research*, **120**, pp. 614-631 (2000).
18. Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M. and Yilmaz, G. "Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms", *Computer and Operation Research*, **32**(4), pp. 967-984 (2005).
19. Cunha, C.B. and Silva, M.R. "A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil", *European Journal of Operation Research*, **179**, pp. 747-758 (2007).
20. Chen, J.F. "A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem", *Omega*, **35**, pp. 211-220 (2007).
21. Mayer, G. and Wagner, B. "HubLocator: An exact solution method for the multiple allocation hub location problem", *Computer and Operation Research*, **29**, pp. 715-739 (2002).
22. Costa, M.G., Captivo, M.E. and Climaco, J. "Capacitated single allocation hub location problem – a bi-criteria approach", *Computer and Operations Research*, **35**, pp. 3695-3671 (2008).

23. Alumur, S. and Kara, B.Y. "Network hub location problem: The state of the art", *European Journal of Operation Research*, **190**, pp. 1-21 (2008).
24. Iravani, S.M.R., *Queueing systems, Volume II: Queueing Models*, 1st edition, Iran University of Science and Technology publication, Tehran, Iran (1993) (in Persian).
25. International Civil Aviation Organization (ICAO), *International Standards and Recommended Practices, Environmental Protection Annex 16, Volume II: Aircraft Engine Emissions*, 2nd edition, ICAO (1993).
26. EEA, *The emission inventory Guidebook* (2010).
27. O'Kelly, M.E. "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities", *European Journal of Operation Research*, **32**, pp. 393-404 (1987).
28. Bureau Statistics of Transportation, [Online] [http://www.transtats.bts.gov/data\\_elements.aspx?data=1](http://www.transtats.bts.gov/data_elements.aspx?data=1).
29. Eurocontrol Experimental Centre, *The Aircraft Noise and Performance (ANP) Database, An International Data Resource for Aircraft Noise Modellers*, [Online] <http://www.aircraftnoisemodel.org/index.php/login>.
30. Conklin and de Decker, *Aviation information*, [Online] <http://www.conklindd.com/CDALibrary/ACCostSummary.aspx>.
31. Nosoohi, I. and Hejazi, S.R. "A multi-objective approach to simultaneous determination of spare part numbers and preventive replacement times", *Applied Mathematical Modelling*, **35**, pp. 1157-1166 (2011).
32. Miettinen, K., *Nonlinear Multiobjective Optimization*, 1st edition, Springer (1998).