

## **Modeling of Environmental and Fuel Challenges in the Air Transportation Hub-and-Spoke Network**

**Mostafa Parsa** \*

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan,  
Iran, m.parsa@in.iut.ac.ir

**Ali Shahandeh**

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan,  
Iran, ali-nook@cc.iut.ac.ir

### **Abstract:**

Sound and air pollution and fuel shortage are the main challenges currently facing the air industry. Research gaps are felt to exist in the scientific investigation of the problem that could properly put the associated challenges into a modeling perspective. The present study aims to develop a novel, multi-objective model that takes into account the triple economic, environmental, and energy objectives of the uncapacitated multiple allocation hub location problem with fixed costs. Efficient solutions are obtained using the  $\varepsilon$ -constraint method while the grouping AHP approach is used for selecting the preferred solution. Computational results of model on the CAB data set will also be reported. Finally, according to the developed model and solution method, domestic air transportation hub-and-spoke network of country of IRAN is proposed.

**Keywords:** Hub and spoke, Hub location problems, Pollution, Fuel, Iran

\* Corresponding author

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶

دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

صص: ۱۷۳-۱۵۱

## مدل سازی چالش‌های زیست‌محیطی و سوخت در شبکه‌های هاب و کمان هوایی

مصطفی پارسا<sup>۱\*</sup>، علی شاهنده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، m.parsa@in.iut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ali-nook@cc.iut.ac.ir

### چکیده

آلودگی صوتی، آلودگی هوا و کمبود سوخت چالش‌های مهم صنعت حمل‌ونقل هوایی در حال حاضر هستند. خلأ مطالعاتی در حوزه شبکه‌های هوایی هاب دیده می‌شود که بتواند این چالش‌های واقعی را در مدل‌سازی دخالت دهد. در این پژوهش با در نظر گرفتن معیارهای گفته شده مدل چندهدفه جدیدی برای مسئله مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت و بدون محدودیت ظرفیت در حالت تخصیص چندگانه ارائه شد. در نهایت با استفاده از روش محدودیت- $\epsilon$  جواب‌های کارا حاصل شد و با استفاده از روش AHP گروهی جواب برتر انتخاب شد. نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل بر مجموعه داده CAB گزارش شد. همچنین در نهایت با توجه به مدل و روش حل ارائه شده، شبکه داخلی حمل‌ونقل هوایی هاب و کمان کشور ایران ارائه شد.

واژگان کلیدی: هاب و کمان، مسائل مکان‌یابی هاب، آلودگی، سوخت، ایران

## ۱- مقدمه

نگرانی‌ها درباره آسب‌های زیست‌محیطی صنعت حمل‌ونقل هوایی به‌خصوص آلودگی صوتی و آلودگی هوا در ۵۰ سال گذشته به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (ماه‌شابد<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). آلودگی صوتی یکی از مهم‌ترین عوامل شکایت‌های مردمی از فرودگاه‌ها است و مخالفت‌های شدیدی را با پروژه‌های مرتبط با توسعه فرودگاه‌ها موجب شده است (ویتز<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). آلاینده‌های خروجی از هواپیماها چون نیتروژن‌اکسیدها ( $NO_x$ )، سولفوردی‌اکسید ( $SO_2$ )، ترکیبات آلی فرار ( $VOC$ )، کربن‌مونواکسید ( $CO$ )، کربن‌دی‌اکسید ( $CO_2$ ) و... به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم باعث آسب‌های جدی بر سلامتی چون امراض تنفسی، ناراحتی‌های عصبی، قلب و عروق و درنهایت مرگ زودرس می‌شوند؛ از این رو، این مشکل نگرانی‌های جدی مردم و جوامع بشری را موجب شده است (آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۰۰، ۲۰۰۸a، ۲۰۰۸b).

صنعت حمل‌ونقل هوایی علاوه بر چالش‌های زیست‌محیطی با بحران انرژی نیز روبه‌روست. آژانس اطلاعات انرژی آمریکا (EIA) در گزارش‌های سالانه خود تحت عنوان «چشم‌انداز بین‌المللی انرژی» آورده است که ۲۰ درصد انرژی جهان در بخش حمل‌ونقل مصرف می‌شود که منبع غالب آن به‌صورت سوخت مایع است. همچنین بیش از نیمی از مصرف سوخت مایع جهان در بخش حمل‌ونقل است (آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۱۰). این سازمان پیش‌بینی کرده است که مصرف سوخت مایع در این بخش سالیانه ۱/۴ درصد و در سال ۲۰۳۵ نسبت به سال ۲۰۰۸، ۴۱ درصد افزایش داشته باشد. این در حالی است که از یک سو قیمت سوخت در سال‌های اخیر به‌صورت کلی روند صعودی داشته و از دیگر سو منابع طبیعی تأمین

سوخت، تجدیدنپذیر و در حال اتمام است (آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۱۱).

تا به حال چالش‌های مطرح‌شده در مسائل مکان‌یابی هاب در نظر گرفته نشده است؛ از این رو، در این پژوهش مدلی چندهدفه جهت تعیین ساختار شبکه‌های حمل‌ونقل هوایی هاب‌وگمان با در نظر گرفتن معیارهای آلودگی هوا، آلودگی صوتی و انرژی ارائه شد. این پژوهش دریچه جدیدی را برای نزدیک کردن مسائل مکان‌یابی هاب با چالش‌های واقعی زندگی انسان‌ها گشوده و برای اولین بار حوزه‌های سلامت و انرژی را وارد این مسائل می‌کند.

## ۲- ادبیات موضوع

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مسائل مکان‌یابی هاب به دو دوره قابل‌تفکیک است:

- دوره نخست (از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ میلادی): بیشتر در این دوره مسائل مختلف مکان‌یابی هاب تعریف و مدل‌سازی‌های گوناگون برای آن ارائه شد.
- دوره دوم (از سال ۲۰۰۱ به بعد): بیشتر در این دوره راه‌حل‌های مختلف این مسائل بررسی شد.

از جمله پژوهش‌های انجام‌شده در دوره نخست می‌توان به مواردی که در ادامه آمده است اشاره کرد: کمپیل<sup>۳</sup> (۱۹۹۴) مسائل مختلف مکان‌یابی هاب را همانند مسائل کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات طبقه‌بندی کرد و مدل‌های موردنظر خود را برای آنها ارائه داد. آیکین<sup>۴</sup> (۱۹۹۴) نوع ظرفیت‌دار مسئله مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت با فرض امکان مسیر مستقیم بین گره‌های غیرهاب را مدل کرد؛ اما مؤثرترین رویکرد جهت برنامه‌ریزی ریاضی مسائل مکان‌یابی هاب ( $USApHMP^1$ ،  $UMApHMP^1$  و  $CSAHLP^v$ ) توسط ارنست و کریشنامورتی<sup>۵</sup> (۱۹۹۶، ۱۹۹۸، ۱۹۹۹) براساس مسیر جریان بر روی

بیشتر مطالعات پیشین در حوزه مسائل مکان‌یابی هاب بر معیار هزینه‌های جریان و احداث شبکه متمرکز بوده و مطالعات کافی با رویکرد چندهدفه انجام نشده است. از شاخص‌ترین پژوهش‌های چندهدفه انجام شده می‌توان به مقاله کستا<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. آنها با نگاهی متفاوت به CSAHLP، به‌جای استفاده از محدودیت ظرفیت، تابع هدف دومی را برای مدل‌سازی ریاضی خود بیان کردند. تابع هدف دوم را به دو صورت در نظر گرفتند. صورت اول این بود که مجموع زمان سرویس در هاب‌ها (مجموع زمانی که جریان‌ها در هاب می‌گذرانند) کمینه می‌شد و در صورت دوم بیشینه زمان سرویس در هر یک از هاب‌ها کمینه می‌شد. تابع هدف اول کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های جریان بود. آنها از یک رویکرد تکراری<sup>۱۸</sup> جهت به‌دست‌آوردن جواب‌های کارا استفاده کردند. شایان ذکر است که این مقاله از معدود مطالعات و بهترین کارهای انجام شده با رویکرد چندهدفه در زمینه مکان‌یابی هاب تا به امروز بوده است. البته این پژوهش صرفاً تئوریک بود و مطالعه موردی نداشت.

مارتی<sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵) روش جدید فراابتکاری براساس جستجوی پراکنده<sup>۲۰</sup> را برای حل مسئله میانه‌پی هاب بدون ظرفیت ارائه کردند که هم در کیفیت و هم سرعت حل با سایر روش‌های توسعه‌داده‌شده برای حل این مسائل قابل رقابت بود. دامگاکینگلو و همکاران (در نوبت چاپ) نوع خاصی از مسائل مکان‌یابی هاب را معرفی کردند که در آن هاب‌ها به‌جای نقاط گسسته می‌توانستند در هر نقطه از صفحه انتخاب شوند. سپس این مسئله را با الگوریتم ژنتیک حل کردند. کریمی و ستاک (۲۰۱۴) مدل‌سازی جدیدی برای مسئله مکان‌یابی هاب بدون ظرفیت با تخصیص چندگانه و شبکه هاب ناقص ارائه کردند که در آن هزینه ثابت احداث کمان در نظر گرفته می‌شد. آنها در این مدل از متغیرها و محدودیت‌های کمتری نسبت به مدل‌های مشابه پیشین

کمان برای هر مبدأ مشخص بنا نهاده شد. ابری<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۰۰) مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و محدودیت ظرفیت ('CMAHLP) را مورد توجه قرار دادند. آنها برای این مسئله، مدل جدیدی ارائه دادند که شبیه مدل ارنست و کریشنامورتی (۱۹۹۸) برای UMAPHMP بود.

در دوره دوم بیشتر پژوهش‌ها به حل مسائل مختلف مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت مرتبط بود. تاپکوگلو<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵) یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی و بدون محدودیت ظرفیت ('USAHLP) ارائه کردند. کنها و سیلوا<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۷) یک راه‌حل ابتکاری براساس ترکیب الگوریتم ژنتیک و آنیل شبیه‌سازی شده برای حل USAHLP ارائه کردند. چن<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۷) راه‌حل‌های ابتکاری دیگری برای USAHLP ارائه داد. الگوریتم وی یک راه‌حل ابتکاری ترکیبی براساس آنیل شبیه‌سازی شده، لیست ممنوعه<sup>۱۵</sup> و رویه‌های بهبود بود. راه‌حل چن از راه‌حل‌هایی که تاپکوگلو و همکارانش (۲۰۰۵) ارائه کرده بودند، هم از لحاظ کیفیت و هم از لحاظ زمان حل بهتر عمل می‌کرد. از آنجا که تا به امروز مقایسه‌ای بین دو راه‌حل ابتکاری که کنها و سیلوا (۲۰۰۷) و چن (۲۰۰۷) ارائه کرده‌اند انجام نشده، می‌توان گفت که این دو الگوریتم از بهترین راه‌حل‌های ابتکاری ارائه شده برای USAHLP تا به امروز بوده‌اند. کانواس<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۰۷) یک راه‌حل ابتکاری جدید براساس روش dual-ascent ارائه کردند. آنها این راه‌حل ابتکاری را درون یک الگوریتم شاخه و کران اجرا کردند. نتایج محاسباتی آنها بر مجموعه داده CAB و AP نشان می‌داد که الگوریتم آنها قادر است شبکه‌های با بیش از ۱۲۰ گره را نیز حل کند. این بهترین نتیجه محاسباتی برای UMAHLP تا به امروز بوده است.

استفاده کردند. آنها جهت حل مدل روش لاگرانژ ساده شده را ارائه کردند که مسئله را به دو زیرمسئله طراحی شبکه و مسیریابی جریان تجزیه می‌کرد.

آلمور و کارا (۲۰۰۸) در جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خود از مرور پژوهش‌های پیشین راجع به مسائل مکان‌یابی هاب به‌خلاف مطالعاتی در این حوزه اشاره کرده‌اند که بتواند چالش‌ها و مشکلات واقعی زندگی انسان‌ها را در مدل‌سازی دخالت دهد. هدف اصلی این پژوهش نزدیک کردن مدل‌های مکان‌یابی هاب به دنیای واقعی و چالش‌های حقیقی پیش روی آن است. در این پژوهش برای نزدیک‌تر کردن مسائل هاب به واقعیت، تنوع هواپیماها و علاوه بر هزینه، معیارهای آلودگی هوا، آلودگی صوتی و انرژی به‌عنوان چالش‌های مهم صنعت حمل‌ونقل هوایی در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- بیان مسئله و فرضیات

گراف کامل  $G(N, A)$  را در نظر بگیرید که  $N = \{1, \dots, n\}$  مجموعه گره‌ها (شهرها) و  $A = N \times N$  مجموعه کمان‌های مستقیم بین گره‌ها است.  $W_{ij}$  تقاضای قطعی برحسب مسافر در ساعت اوج بین گره مبدأ  $i$  و گره مقصد  $j$  و  $d_{ij}$  فاصله بین گره‌های  $i$  و  $j$  است. فاصله گفته‌شده اقلیدسی است و نامساوی مثلثی نیز برقرار است.  $V = \{1, \dots, q\}$  مجموعه انواع هواپیماهای سنگین مسافربری و  $\hat{V} = \{1, \dots, \hat{q}\}$  مجموعه انواع هواپیماهای بزرگ مسافربری است. فرض است که از هواپیماهای مسافربری بزرگ نوع  $\hat{v} \in \hat{V}$  برای نقل‌وانتقال بین گره غیرهاب و گرهی هاب و از هواپیماهای مسافربری سنگین نوع  $v \in V$  برای نقل‌وانتقال مسافران بین گره‌های هاب استفاده شود. هر جریان از مبدأ به مقصد به‌صورت بالقوه سه جزء دارد: ادغام (از گره مبدأ به هاب)، انتقال (از هاب به هاب دیگر) و توزیع (از هاب

به مقصد). هزینه هر واحد جریان هر جزء متناسب با فاصله اقلیدسی بین گره‌هاست و در ضریبی مختص آن جزء ضرب می‌شود که به‌ترتیب از چپ به راست عبارت‌اند از:  $\delta$  و  $\alpha$  و  $\chi$ . به‌دلیل کارایی جزء انتقال،  $\alpha < 1$  و ثابت و مستقل از اندازه جریان بر مسیر بین هاب‌ها و  $\delta = \chi = 1$  فرض می‌شود. فرض است که در هر مسیر بین مبدأ و مقصد، حداقل یک هاب وجود داشته باشد و شبکه حاصل از اتصال هاب‌ها گراف کامل باشد. تعداد هاب‌ها از قبل مشخص نیست، بنابراین برای احداث هاب در گره  $k$  هزینه ثابتی برابر  $F_k$  در نظر گرفته می‌شود. هر یک از گره‌های غیرهاب می‌توانند به یک و یا بیش از یک هاب متصل شوند (تخصیص چندگانه).

### ۴- مدل‌سازی

#### ۴-۱- مدل پایه

در این پژوهش مدل ابری و همکاران (۲۰۰۰) برای توسعه انتخاب شد. آنها در این مدل‌سازی مشابه رویکرد ارنست و کریشنامورتی (۱۹۹۸) سه مجموعه از متغیرهای 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 جزء 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 ۰ است. ابری و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از متغیرهای بالا مسئله CMAHLP را به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ( $MIP^1$ ) زیر مدل کردند:

$$\min \sum_{i \in V} \left[ \sum_{k \in V} \chi d_{ik} Z_{ik} + \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} \alpha d_{kl} Y_{kl}^i + \sum_{l \in V} \sum_{j \in V} \delta d_{lj} X_{lj}^i \right] + \sum_{k \in V} F_k H_k \quad (1)$$

S. t.

$$\sum_{k \in V} Z_{ik} = \sum_{j \in V} W_{ij} \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{l \in V} X_{lj}^i = W_{ij} \quad \forall i, j \in V \quad (3)$$

$$Z_{ik} + \sum_{l \in V} Y_{lk}^i = \sum_{l \in V} Y_{kl}^i + \sum_{j \in V} X_{kj}^i \quad \forall i, k \in V \quad (4)$$

$$\sum_i X_{ij}^i \leq \sum_{i \in V} W_{ij} H_l \quad \forall j, l \in V \quad (5)$$

$$Z_{ik} \leq \sum_{j \in V} W_{ij} H_k \quad \forall i, k \in V \quad (6)$$

$$\sum_i Z_{ik} \leq \Gamma_k H_k \quad (7)$$

$$Z_{ik}, Y_{lk}^i, X_{lj}^i \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \in V \quad (8)$$

$$H_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in V \quad (9)$$

#### ۴-۲- توصیف مدل چندهدفه

در بیشتر مطالعات پیشین در زمینه مسائل مکان‌یابی هاب فقط به هزینه به‌عنوان تابع هدف اصلی در مدل‌سازی توجه شده است؛ اما همان‌طور که در مقدمه گفته شد امروزه در شرایط واقعی صنعت حمل‌ونقل هوایی علاوه بر هزینه، معیارهای دیگری چون آلودگی هوا و آلودگی صوتی و انرژی نیز مهم است. در ادامه نحوه مدل‌کردن توابع هدف موردنظر و محدودیت‌های اضافه‌شده به مدل پایه بررسی می‌شود.

#### ۴-۲-۱- تابع هدف هزینه

ابری و همکاران (۲۰۰۰) تابع هزینه کلاسیک را برای MAHLP مطابق رابطه (۱) ارائه کرده‌اند. این تابع مجموع هزینه‌های جریان و احداث هاب را محاسبه می‌کند. در این پژوهش با توجه به در نظر گرفتن تنوع

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌های جریان و احداث هاب‌ها را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که همه جریان از هر مبدأ از آن مبدأ خارج شود. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که همه جریان‌ها برای هر جفت مبدأ-مقصدی به مقصد صحیح خود وارد شوند. محدودیت (۴) تساوی بقای جریان در هر هاب را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۵) و (۶) تضمین می‌کنند که گره‌های هاب به‌ترتیب برای هر جزء توزیع و ادغام از هر مسیری استفاده شوند. در واقع محدودیت‌های (۵) و (۶) فرض نبود مسیر مستقیم بین گره‌های هاب را تضمین می‌کنند. رابطه (۷) مربوط به محدودیت ظرفیت هاب‌هاست. برای مدل‌کردن UMAHLP کافی است محدودیت مربوط به ظرفیت هاب‌ها با رابطه (۷) را از مدل بالا حذف کنیم.

از  $\hat{v} \in \hat{V}$  نوع  $X_{lj}^{(i,\hat{v})}$  جریان برحسب هواپیمای نوع  $\hat{v}$  از

هاب  $l$  به  $j$  با شروع از گره  $i$

$c^v$ : هزینه پرواز هواپیمای نوع  $v \in V$  در واحد

مسافت

$c^{\hat{v}}$ : هزینه پرواز هواپیمای نوع  $\hat{v} \in \hat{V}$  در واحد

مسافت

هواپیماها این تابع کلاسیک به صورت رابطه (۱۰) تغییر می‌کند.

$Z_{ik}^{(\hat{v})}$ : جریان برحسب هواپیمای نوع  $\hat{v} \in \hat{V}$  از

گره  $i$  به گره هاب  $k$

$Y_{kl}^{(i,v)}$ : جریان برحسب هواپیمای نوع بزرگ

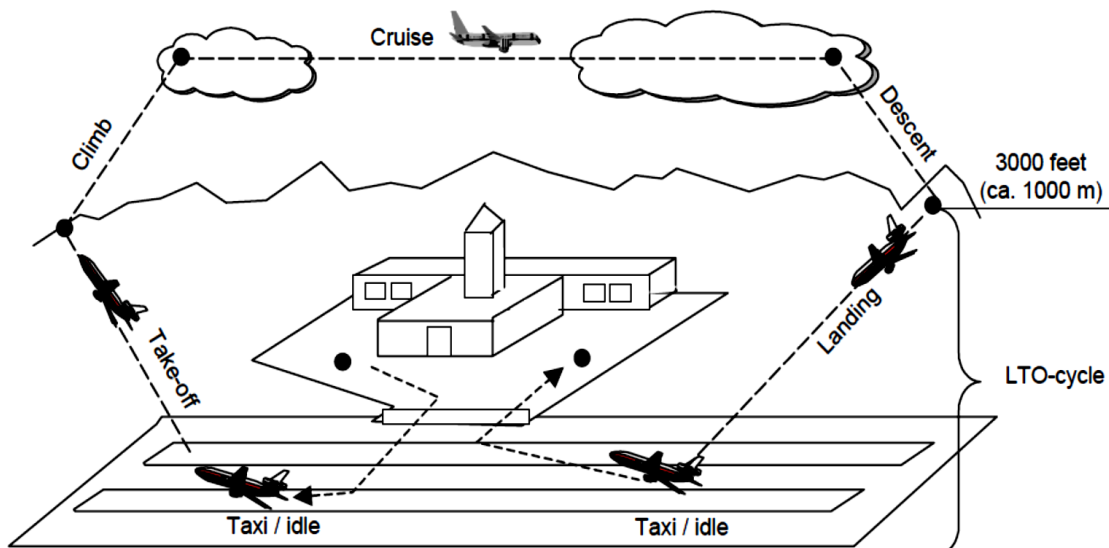
$v \in V$  از هاب  $k$  به هاب  $l$  با شروع از گره  $i$

$$Cost = \sum_i \left[ \sum_k \sum_{\hat{v}} \chi c^{\hat{v}} d_{ik} Z_{ik}^{(\hat{v})} + \sum_k \sum_l \sum_v \alpha c^v d_{kl} Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_l \sum_j \sum_{\hat{v}} \delta c^{\hat{v}} d_{lj} X_{lj}^{(i,\hat{v})} \right] + \sum_k F_k H_k \quad (10)$$

محسوب می‌شود (ایکائو، ۱۹۹۳). پرواز مستوی همه فعالیت‌های هواپیما را دربرمی‌گیرد که در بالاتر از ارتفاع ۳۰۰۰ فوتی (۱۰۰۰ متری) رخ می‌دهد. طبق تعریف، اوج‌گیری<sup>۲۸</sup> در پایان آمادگی برای اوج، پرواز مستوی و نزول<sup>۲۹</sup> از ارتفاع پرواز مستوی تا شروع عملیات تقرب فرود فعالیت‌های انجام‌شده هواپیما در پرواز مستوی محسوب می‌شود (آژانس محیط‌زیست اروپا، ۲۰۱۰) (شکل ۱).

#### ۴-۲-۲- تابع هدف آلودگی هوا و مصرف سوخت

به‌طور کلی عملیات هواپیماها به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱. چرخه نشست/برخاست (LTO<sup>۳۲</sup>) ۲. پرواز مستوی<sup>۳۳</sup>. چرخه نشست و برخاست (LTO)، همه فعالیت‌های هواپیما نزدیک فرودگاه را دربرمی‌گیرد که پایین‌تر از ارتفاع ۳۰۰۰ فوتی (۱۰۰۰ متری) رخ می‌دهد؛ بنابراین خزش برای برخاست<sup>۲۴</sup>، آمادگی برای اوج<sup>۲۵</sup>، تقرب فرود<sup>۲۶</sup> و خزش بعد از فرود<sup>۲۷</sup> فعالیت‌های انجام‌شده هواپیماها در چرخه LTO



شکل ۱- بخش‌های مختلف پرواز استاندارد هواپیماها (آژانس محیط‌زیست اروپا، ۲۰۱۰)

به‌طور کلی سه روش به نام‌های بسیار ساده<sup>۳۰</sup>، ساده<sup>۳۱</sup> و

با جزئیات<sup>۳۲</sup> برای محاسبه میزان آلودگی هواپیماها

توسط آژانس محیط‌زیست اروپا<sup>۳۳</sup> (۲۰۱۰) توسعه داده

شده است. در این پژوهش از روش با جزئیات که

روش دقیق‌تری است استفاده شد. در این روش آمده

است که میزان هر یک از آلاینده‌های  $CO$ ،  $NO_x$ ،

$VOC$ ،  $SO_2$  و  $CO_2$  و سوخت مصرفی در هر چرخه

LTO برای هر یک از انواع هواپیماها میزان ثابتی است

که از جداول مرتبط (آژانس محیط‌زیست اروپا، ۲۰۱۰)

قابل دریافت است. اما در این روش برای محاسبه

آلاینده‌های  $CO$ ،  $NO_x$  و  $VOC$  و سوخت مصرفی هر

یک از انواع هواپیماها در پرواز مستوی از تابع تکه‌ای

خطی برحسب مسافت استفاده می‌شود؛ بدین‌گونه که

در جداول مرتبط (آژانس محیط‌زیست اروپا، ۲۰۱۰) و

در فواصل استاندارد میزان آلاینده‌های گفته‌شده و

مصرف سوخت به‌طور جداگانه برای هر یک از انواع

هواپیماها محاسبه می‌شود و برای به‌دست‌آوردن میزان

آلاینده خروجی موردنظر یا سوخت مصرفی در فاصله

طی‌شده از درون‌یابی بین فواصل استاندارد استفاده

می‌شود. در این روش برای محاسبه میزان آلاینده‌های

$SO_2$  و  $CO_2$  در پرواز مستوی از تناسب ساده‌ای

براساس نسبت میزان  $SO_2$  و  $CO_2$  تولیدی از هر واحد

سوخت مصرفی استفاده می‌شود. بدین ترتیب به‌منظور

صورت‌بندی ریاضی آلودگی هوا در مدل‌سازی نهایی

ابتدا نمادهای زیر تعریف می‌شود:

$P$ : مجموعه انواع آلاینده‌های تولیدی هواپیماها

$$P = \{VOC, NO_x, CO, CO_2, SO_2\}$$

$EF_p^{(v,LTO)}$ : میزان تولید آلاینده  $p \in P$  برای هواپیمای

$v \in V$  در هر چرخه LTO

$EF_p^{(v,LTO)}$ : میزان تولید آلاینده  $p \in P$  برای هواپیمای

$v \in V$  در هر چرخه LTO

$EF_{fuel}^{(v,LTO)}$ : میزان مصرف سوخت هواپیمای

در هر چرخه LTO

$EF_{fuel}^{(v,LTO)}$ : میزان مصرف سوخت هواپیمای

در هر چرخه LTO

$EF_p^{cruise}$ : نسبت میزان آلاینده  $p \in \{CO_2, SO_2\}$

خروجی از هر واحد سوخت مصرفی در بخش پرواز

مستوی

$f_p^{u,cruise}(d)$ : مقدار تابع تکه‌ای خطی مربوط به

میزان آلاینده  $p \in \{VOC, NO_x, CO\}$  خروجی از

هواپیمای  $u \in U = VU\dot{V}$  برحسب مسافت

پیموده‌شده در بخش پرواز مستوی

$f_{fuel}^{u,cruise}(d)$ : مقدار تابع تکه‌ای خطی مربوط به

میزان سوخت مصرفی هواپیمای  $u \in U$  برحسب

مسافت پیموده‌شده در بخش پرواز مستوی.

بدین ترتیب میزان آلاینده  $p \in \{VOC, NO_x, CO\}$

تولیدی هواپیمای  $u$  با پیمودن فاصله  $d_{ij}$  برابر است

با:

$$EF_p^{(u,LTO)} + f_p^{u,cruise}(d_{ij})$$

و میزان آلاینده  $p \in \{CO_2, SO_2\}$  تولیدی هواپیمای  $u$

با پیمودن فاصله  $d_{ij}$  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

به‌صورت رابطه (۱۱) برای آلاینده‌های

$CO$ ،  $NO_x$  و  $VOC$  و رابطه (۱۲) برای آلاینده‌های

$SO_2$  و  $CO_2$  نوشت:

همچنین می‌توان تابع هدف مربوط به مجموع میزان

مصرف سوخت را به‌صورت رابطه (۱۳) نوشت:



$$\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_p^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{V=1}^p \left( EF_p^{(v,LTO)} + f_p^{v,cruise}(d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i,v)} \right. \\ \left. + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_p^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \\ \forall p \in \{VOC, NO_x, CO\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \times EF_p^{cruise} \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{V=1}^p \left( EF_p^{(v,LTO)} + f_{fuel}^{v,cruise}(d_{kl}) \times EF_p^{cruise} \right) Y_{kl}^{(i,v)} \right. \\ \left. + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \times EF_p^{cruise} \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \\ \forall p \in \{CO_2, SO_2\} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_{fuel}^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{V=1}^p \left( EF_{fuel}^{(v,LTO)} + f_{fuel}^{v,cruise}(d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i,v)} \right. \\ \left. + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{V=1}^q \left( EF_{fuel}^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \\ (13)$$

دلخواه را در نظر می‌گیرد. بنابراین SEL می‌کوشد تا آسیب‌های جمعی حاصل از سروصدای یک هواپیما بر شنونده را اندازه‌گیری کند. تراز شدت صوت معادل  $L_{eq}$  یکی از سنجش‌های جمعی استاندارد سازمان هوایی فدرال آمریکا (FAA) است. این سنجش میانگین سروصدای تعدادی هواپیما در طول بازه زمانی مشخصی را بیان می‌کند. این شاخص می‌تواند در هر زمان دلخواهی به کار گرفته شود و مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود (دنوفیل و ادنی، ۲۰۰۳).

#### ۴-۲-۳- تابع هدف آلودگی صوتی

بیشتر اندازه‌گیری‌هایی که در عمل برای سنجش سروصدای فرودگاه‌ها استفاده می‌شود به دو جزء تقسیم می‌شود: اندازه‌گیری مربوط به تک‌رویداد<sup>۳۴</sup> که به حرکت یک هواپیما مرتبط است و اندازه‌گیری جمعی<sup>۳۵</sup> که اثر جمعی تعداد زیادی از حرکت هواپیماها در یک بازه زمانی مشخصی را منعکس می‌کند. یکی از سنجش‌هایی که برای توصیف اندازه‌گیری مربوط به تک‌رویداد استفاده می‌شود SEL<sup>۳۶</sup> است. این سنجش همه اندازه‌گیری ثبت‌شده از تراز شدت صوت یک هواپیما در طول بازه زمانی

$E(SEL_v^{approach})$ : متوسط SEL تولیدشده توسط

هوایمای  $v$  در هنگام نشست برحسب دسی‌بل وزن‌دار

$E(SEL_v^{departure})$ : متوسط SEL تولیدشده توسط

هوایمای  $v$  در هنگام برخاست برحسب دسی‌بل وزن‌دار

$E(SEL_v^{approach})$ : متوسط SEL تولیدشده توسط

هوایمای  $\hat{v}$  در هنگام نشست برحسب دسی‌بل وزن‌دار

$E(SEL_v^{departure})$ : متوسط SEL تولیدشده توسط

هوایمای  $\hat{v}$  در هنگام برخاست برحسب دسی‌بل وزن‌دار

$(Leq)_f$ : تراز شدت صوت معادل در گره  $f$  برحسب دسی‌بل وزن‌دار

$position$ : می‌تواند  $landing$  (نشست) یا  $takeoff$  (برخاست) باشد.

$\lambda_f^{(u,position)}$ : تعداد هوایماهای نوع  $u \in U$  خواهان

نشست (برخاست)، واردشده در ساعت پیک به

فرودگاه(های) شهر  $f \in F$ . این متغیر با روابط (۱۵) تا

(۱۸) حاصل می‌شود.

$SEL_j$ :  $SEL$  محاسبه‌شده از حرکت هوایمای  $j$ ام

(برحسب دسی‌بل وزن‌دار  $(dBA)^{38}$ )

$T$ : طول بازه زمانی (برحسب ثانیه) برای محاسبه  $Leq$

$$Leq = 10 \times \log \left( \frac{1}{T} \sum_{j=1}^M 10^{\frac{SEL_j}{10}} \right) \quad (14)$$

جهت مدلسازی شاخص آلودگی صوتی تنها گره‌هایی

در نظر گرفته می‌شود که در معرض آلودگی صوتی قرار

دارند. این نقاط با حرف  $f$  و مجموعه آنها با حرف  $F$

نشان داده می‌شود. همچنین در مدل برای کمی‌کردن

آلودگی صوتی هوایماها از  $E(SEL)$  یعنی مقدار

موردانتظار  $SEL$  استفاده شده است که متوسط  $SEL$

ایجادشده توسط هوایما است. فرض می‌شود مقدار آن

برای هوایماهای هم‌نوع یکسان است. جهت

صورت‌بندی ریاضی آلودگی صوتی در مدلسازی

نهایی نمادهای زیر تعریف می‌شود:

$T$ : طول بازه زمانی موردنظر برحسب ثانیه برای

محاسبه شدت سروصدا

$$\lambda_f^{(v,landing)} = \sum_i \sum_f Y_{if}^{(i,v)} \quad \forall f, v, \quad (15)$$

$$\lambda_f^{(\hat{v},landing)} = \sum_{i,i \neq f} Z_{if}^{(\hat{v})} + \sum_j \sum_{i,i \neq f} X_{if}^{(j,\hat{v})} \quad \forall f, \hat{v}, \quad (16)$$

$$\lambda_f^{(v,takeoff)} = \sum_i \sum_l Y_{fl}^{(i,v)} \quad \forall f, v, \quad (17)$$

$$\lambda_f^{(\hat{v},takeoff)} = \sum_{i,i \neq f} Z_{fi}^{(\hat{v})} + \sum_i \sum_{j,j \neq f} X_{fj}^{(i,\hat{v})} \quad \forall f, \hat{v}, \quad (18)$$

با استفاده از رابطه (۱۴) تراز شدت صوت معادل در از آنجایی که رابطه (۱۹) غیرخطی است، به صورت زیر گرهی  $f$  مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می شود. به فرم خطی (رابطه (۲۰)) تبدیل می شود:

$$\forall f \in F: (Leq)_f = 10 \cdot \log \left\{ \frac{1}{T} \left[ \sum_v \lambda_f^{(v,landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{approach})}{10}} + \sum_v \lambda_f^{(v,takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{departure})}{10}} + \sum_{\hat{v}} \lambda_f^{(\hat{v},landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{approach})}{10}} + \sum_{\hat{v}} \lambda_f^{(\hat{v},takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{departure})}{10}} \right] \right\} \quad (19)$$

$$\forall f \in F: 10^{\left(\frac{(Leq)_f}{10}\right)} \times T = \sum_v \lambda_f^{(v,landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{approach})}{10}} + \sum_v \lambda_f^{(v,takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{departure})}{10}} + \sum_{\hat{v}} \lambda_f^{(\hat{v},landing)} \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{approach})}{10}} + \sum_{\hat{v}} \lambda_f^{(\hat{v},takeoff)} \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{departure})}{10}} \quad (20)$$

$n^{\hat{v}}$ : تعداد هواپیماهای نوع  $\hat{v} \in \hat{V}$  که در جزء ادغام و توزیع (بین گره های هاب و غیرهاب) پرواز می کنند. این متغیر از رابطه (۲۲) حاصل می شود. با داشتن پارامترهای  $y^{\hat{v}}$  و  $y^v$  محدودیت های مورد نظر مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) به مدل نهایی اضافه خواهد شد.

$y^v$ : تعداد هواپیماهای نوع  $v \in V$  در دسترس شرکت هواپیمایی

$y^{\hat{v}}$ : تعداد هواپیماهای نوع  $\hat{v} \in \hat{V}$  در دسترس شرکت هواپیمایی

۴-۲-۴- محدودیت تعداد هواپیماهای در دسترس از هر نوع

برای صورت بندی ریاضی محدودیت مربوط به تعداد هواپیماهای در دسترس از هر نوع در مدل سازی نهایی نمادهای زیر تعریف می شود:

$n^v$ : تعداد هواپیماهای نوع  $v \in V$  که در جزء انتقال (بین گره های هاب) پرواز می کنند. این متغیر از رابطه (۲۱) به دست می آید.

$$n^v = \sum_i \sum_k \sum_{l, l \neq k} Y_{kl}^{(i,v)} \quad \forall v, \quad (21)$$

$$n^{\hat{v}} = \sum_i \sum_l \sum_{j, j \neq l} X_{lj}^{(i,\hat{v})} + \sum_i \sum_{k, k \neq i} Z_{ik}^{(\hat{v})} \quad \forall \hat{v}, \quad (22)$$

$$n^v \leq y^v \quad \forall v, \quad (23)$$

$$n^{\hat{v}} \leq y^{\hat{v}} \quad \forall \hat{v}, \quad (24)$$

با توجه به مدل پایه و توابع هدف و محدودیت‌های توسعه داده‌شده در بخش‌های قبلی مدل نهایی چندهدفه را به صورت زیر توسعه می‌دهیم:

$$\min \sum_i \left[ \sum_k \sum_{\dot{v}} \chi c^{\dot{v}} d_{ik} Z_{ik}^{(\dot{v})} + \sum_k \sum_l \sum_v \alpha c^v d_{kl} Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_l \sum_j \sum_{\dot{v}} \delta c^{\dot{v}} d_{lj} X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] + \sum_k F_k H_k \quad (25)$$

$$\min \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_p^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{v=1}^p \left( EF_p^{(v,LTO)} + f_p^{v,cruise}(d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_p^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \quad (26)$$

$$\forall p \in \{VOC, NO_x, CO\}$$

$$\min \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \times EF_p^{cruise} \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{v=1}^p \left( EF_p^{(v,LTO)} + f_{fuel}^{v,cruise}(d_{kl}) \times EF_p^{cruise} \right) Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_p^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \times EF_p^{cruise} \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \quad (27)$$

$$\forall p \in \{CO_2, SO_2\}$$

$$\min \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_{fuel}^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{ik}) \right) Z_{ik}^{(\dot{v})} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{v=1}^p \left( EF_{fuel}^{(v,LTO)} + f_{fuel}^{v,cruise}(d_{kl}) \right) Y_{kl}^{(i,v)} + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\dot{v}=1}^q \left( EF_{fuel}^{(\dot{v},LTO)} + f_{fuel}^{\dot{v},cruise}(d_{lj}) \right) X_{lj}^{(i,\dot{v})} \right] \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \min \sum_v \sum_i \sum_f Y_{lf}^{(i,v)} &\times 10^{\frac{E(SEL_v^{approach})}{10}} + \sum_v \sum_i \sum_l Y_{fl}^{(i,v)} \times 10^{\frac{E(SEL_v^{departure})}{10}} \quad (29) \\ &+ \sum_{\hat{v}} \left( \sum_{i,l \neq f} Z_{if}^{(\hat{v})} + \sum_j \sum_{i,l \neq f} X_{if}^{(j,\hat{v})} \right) \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{approach})}{10}} \\ &+ \sum_{\hat{v}} \left( \sum_{i,l \neq f} Z_{fi}^{(\hat{v})} + \sum_i \sum_{j,j \neq f} X_{fj}^{(i,\hat{v})} \right) \times 10^{\frac{E(SEL_{\hat{v}}^{departure})}{10}} \quad \forall f \end{aligned}$$

S. t. (30)

$$\sum_{\hat{v}} \sum_k Z_{ik}^{(\hat{v})} t^{\hat{v}} = \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad \forall i,$$

$$\sum_{\hat{v}} \sum_L X_{lj}^{(i,\hat{v})} t^{\hat{v}} = W_{ij} \quad \forall i, j, \quad (31)$$

$$\sum_{\hat{v}} Z_{ik}^{(\hat{v})} t^{\hat{v}} + \sum_v \sum_l Y_{lk}^{(i,v)} t^v = \sum_v \sum_l Y_{kl}^{(i,v)} t^v + \sum_{\hat{v}} \sum_j X_{kj}^{(i,\hat{v})} t^{\hat{v}} \quad \forall i, k, \quad (32)$$

$$\sum_{\hat{v}} Z_{ik}^{(\hat{v})} t^{\hat{v}} \leq \sum_j W_{ij} H_k \quad \forall i, k, \quad (33)$$

$$\sum_{\hat{v}} \sum_{i=1} X_{lj}^{(i,\hat{v})} t^{\hat{v}} \leq \sum_{i=1} W_{ij} H_l \quad \forall l, j, \quad (34)$$

$$\sum_i \sum_k \sum_{l,l \neq k} Y_{kl}^{(i,v)} \leq y^v \quad \forall v, \quad (35)$$

$$\sum_i \sum_l \sum_{j,j \neq l} X_{lj}^{(i,\hat{v})} + \sum_i \sum_{k,k \neq i} Z_{ik}^{(\hat{v})} \leq y^{\hat{v}} \quad \forall \hat{v}, \quad (36)$$

$$X_{lj}^{(i,\hat{v})}, Y_{kl}^{(i,v)}, Z_{ik}^{(\hat{v})} \geq 0 \quad \forall i, l, j, k, \quad (37)$$

$$H_k \in \{0,1\} \quad \forall k, \quad (38)$$

آلاینده‌های تولیدی هواپیماها به تفکیک برای ترکیبات آلی فرار، اکسیدهای نیتروژن‌دار و کربن‌مونواکسید را گوگردی‌اکسید را کمینه می‌کند. تابع هدف (۲۸) مجموع میزان سوخت مصرفی هواپیماها را کمینه

تابع هدف (۲۵) مجموع هزینه‌های جریان و احداث هاب را کمینه می‌کند. تابع هدف (۲۶) میزان کل کمینه می‌کند. تابع هدف (۲۷) میزان کل آلاینده‌های تولیدی هواپیماها به تفکیک برای کربن‌دی‌اکسید و

جدول ۱- ضرایب تبدیل برای تخمین تعداد مسافران ساعت پیک از مجموع مسافران روزانه در ماه پیک

نسبت تعداد مسافران در ساعت پیک به میانگین تعداد مسافران روزانه در ماه پیک	مجموع مسافران سالانه
۷-۱۰٪	بیش از ۲۰ میلیون
۸-۱۲٪	۱۰-۲۰ میلیون
۹-۲۰٪	۱-۱۰ میلیون

## ۶ - حل مدل چندهدفه نهایی

اولین گام در حل یک مسئله چندهدفه شدنی، بررسی جواب‌های بهینه حاصل از حل مسائل تک‌هدفه هریک از توابع هدف با توجه به فضای شدنی مسئله چندهدفه است. در صورتی که این جواب‌ها یکسان باشد جواب به دست آمده جواب بهینه مسئله چندهدفه است. در غیر این صورت می‌توان با روش‌های MODM جواب‌های کارا را به دست آورد و سپس با یکی از روش‌های MADM یکی از جواب‌های کارا را به عنوان جواب برتر انتخاب کرد. در این پژوهش با روش محدودیت-ε جواب‌های کارا به دست آورده شد و از روش AHP گروهی برای انتخاب جواب برتر استفاده شد.

در این قسمت برای حل مدل از مجموعه داده CAB<sup>۱</sup> استفاده شد. جریان در این مجموعه داده برحسب مسافران هوایی داخلی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۰ بین ۲۵ شهر آمریکا (شکل ۲) است. کل جریان در مجموعه داده CAB برابر ۸۵۴۰۰۰۶ مسافر است که ۵۱ درصد از کل جریان مسافران داخلی بین تمامی شهرهای آمریکا را تشکیل می‌دهد (اکلی، ۱۹۸۷). مجموع جریان مسافران هوایی داخلی در طول سال ۱۹۷۰ برابر ۱۵۳۶۶۲۰۰۰ مسافر بوده است (سازمان هوایی فدرال، ۱۹۷۹)؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مجموعه داده CAB در ماه اوج سال ۱۹۷۰ جمع‌آوری شده

می‌کند. تابع هدف (۲۹) میزان سروصدای فرودگاه(های) هریک از شهرهایی که در معرض آلودگی صوتی قرار دارند را کمینه می‌کند. توضیح محدودیت‌های (۳۰) تا (۳۴) به ترتیب با توضیح محدودیت‌های (۲) تا (۶) یکسان است. محدودیت‌های (۳۵) و (۳۶) مربوط به محدودیت تعداد هواپیماهای در دسترس از هر نوع است.

## ۵- تحلیل ساعت اوج

در طراحی و برنامه‌ریزی فرودگاه‌ها مفاهیمی چون طراحی براساس پیک روزانه (DPD<sup>۳</sup>) و طراحی ساعت اوج (DPH<sup>۴</sup>) مطرح است. تسهیلات فرودگاه‌ها معمولاً براساس ساعت اوج طراحی می‌شوند. هدف طراحی ساعت اوج، اطمینان از توانایی فرودگاه‌ها برای تأمین تقاضاها در سطح مطلوبی از خدمت، تقریباً در سراسر سال است (دنوفیل و ادنی، ۲۰۰۳). در این پژوهش برای تعیین ساختار شبکه‌های هاب‌و‌کمان از تحلیل ساعت اوج برای تخمین جریان (تقاضا) بین گره‌ها استفاده می‌شود. تقاضای سالانه یا ماهیانه می‌تواند از طریق ضرایبی تبدیل به تقاضا در طول ساعت اوج شود. این ضرایب براساس تجربه الگوهای پیک فرودگاه‌ها با اندازه‌های گوناگون تهیه شده است و معمولاً تقریب اولیة خوبی را به دست می‌دهند. به طور مثال در جدول ۱ نسبت تعداد مسافران در ساعت پیک به میانگین تعداد مسافران روزانه در ماه پیک برای فرودگاه‌های کشور آمریکا با اندازه‌های مختلف منعکس شده است (دنوفیل و ادنی، ۲۰۰۳). در ادامه پژوهش از ضرایب گفته شده در جدول ۱ استفاده می‌شود.

است. با استفاده از ضریب ۰/۱ از جدول ۱ ماتریس جریان در ساعت پیک قابل تخمین است. ضریب تخفیف بخش انتقال ( $\alpha$ ) برابر ۰/۵ و هزینه ثابت احداث هر هاب ۱۰۰۰۰۰ فرض شد.

با توجه به در نظر گرفتن تنوع هواپیماها به عنوان عامل تأثیرگذار در طراحی شبکه سه نوع هواپیمای بزرگ برای پرواز در جزء ادغام و توزیع به نام‌های A320-200، B737-400 و MD82 هر یک به تعداد ۱۰۰ فروند ( $\forall v: y^v = 100$ ) و سه نوع هواپیمای سنگین برای پرواز در جزء انتقال به نام‌های B767-200ER، B767-300ER و B757-200 هر یک به تعداد ۲۵ فروند ( $\forall v: y^v = 25$ ) در نظر گرفته شدند. <sup>۴۳</sup> مابقی داده‌های مربوط به هواپیماها از سایت کارخانه‌های سازنده آنها دریافت شد. مشخصات هواپیماهای گفته شده در جدول ۲ گزارش شده است. برای تابع هدف مربوط به سروصدا در مدل نهایی فقط کلان‌شهر نیویورک ملاک قرار داده شد. در مدل چندهدفه پیشنهادی هدف‌های زیر در نظر گرفته شده است. در ادامه به صورت گام‌به‌گام، مسئله حل می‌شود.

جدول ۲- مشخصات هواپیماهای در نظر گرفته شده

هزینه پرواز (\$/mile)	(dBA) SEL		ظرفیت (برحسب مسافر)	نوع هواپیما	مدل هواپیما	کارخانه سازنده
	برخاست	نشست				
۱۳/۵۳۴	۸۸/۴	۸۴/۲	۱۵۰	بزرگ (L)	A320-200	Airbus
۱۶/۵۷۳	۸۷/۶	۸۵	۱۴۷	بزرگ (L)	B737-400	Boeing
۱۶/۸۷۳	۸۶/۶	۸۱/۷	۱۴۳	بزرگ (L)	MD 82	McDonnell Douglas
۲۲/۸۴۹	۸۹/۳	۸۷/۴	۱۸۱	سنگین (H)	B767-200ER	Boeing
۲۳/۸۲۶	۸۹/۳	۸۷/۴	۲۱۸	سنگین (H)	B767-300ER	Boeing
۱۹/۵۸۷	۸۵/۳	۸۴/۶	۲۰۰	سنگین (H)	B757-200	Boeing

- $f_1$ : مجموع هزینه‌ها (هزینه حمل و نقل 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  $NO_x$  برحسب تن
- $f_5$ : میزان کل آلودگی CO برحسب تن
- $f_6$ : میزان کل آلودگی  $CO_2$  برحسب تن
- $f_7$ : میزان کل آلودگی  $SO_2$  برحسب تن
- $f_8$ : مجموع میزان مصرف سوخت برحسب تن



- |                |                  |
|----------------|------------------|
| 1 ATLANTA      | 14 MIAMI         |
| 2 BALTIMORE    | 15 MINNEAPOLIS   |
| 3 BOSTON       | 16 NEW ORLEANS   |
| 4 CHICAGO      | 17 NEW YORK      |
| 5 CINCINNATI   | 18 PHILADELPHIA  |
| 6 CLEVELAND    | 19 PHOENIX       |
| 7 DALLAS-FW    | 20 PITTSBURGH    |
| 8 DENVER       | 21 ST. LOUIS     |
| 9 DETROIT      | 22 SAN FRANCISCO |
| 10 HOUSTON     | 23 SEATTLE       |
| 11 KANSAS CITY | 24 TAMPA         |
| 12 LOS ANGELES | 25 WASHINGTON    |
| 13 MEMPHIS     |                  |

شکل ۲- مجموعه داده CAB

۱-۶- شدنی بودن مسئله (نا تهی بودن فضای جواب)

قبل از حل مسئله باید شدنی بودن آن را بررسی کرد. یکی از تکنیک‌های متداول در بررسی شدنی بودن یک مسئله استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی<sup>۴۴</sup> است. شکل کلی مدل چندهدفه به صورت رابطه (۳۹) در نظر گرفته می‌شود:

برای بررسی فضای جواب مطابق با رابطه (۴۰) 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.

در صورتی که ارزش تابع هدف از حل بهینه مدل با رابطه (۴۰) صفر باشد، فضای جواب نا تهی است و مسئله شدنی است و در غیر این صورت نشدنی است.

۲-۶- تحلیل هدف‌ها

در مدل چندهدفه نهایی، تابع هدف اول هزینه برحسب واحد پول، تابع هدف دوم شدت سروصدا برحسب دسی‌بل وزن دار، توابع هدف سوم تا هفتم جرم آلاینده تولیدی و تابع هدف هشتم جرم سوخت مصرفی برحسب تن است. بنابراین هر یک از هدف‌ها مقیاس و واحد مخصوص به خود را دارند و یکپارچه کردن آن مشکل است. برای فهم اینکه آیا  $k$  تابع هدف مدل با رابطه (۳۹) جهت‌گیری‌های بهینه یکسانی دارند یا خیر  $k$  مسئله تک‌هدفه حاصل از در نظر گرفتن یکایک توابع هدف به‌طور جداگانه به صورت رابطه (۴۱) حل می‌شود.

$$\min\{f_j(x), j = 1, 2, \dots, k\} \quad (39)$$

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

$$\min \sum_{i=1}^m d_i^- + d_i^+ \quad (40)$$

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

$$\forall j: \min f_j(x) \quad (41)$$

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

شرح داده شده بررسی شد. صفر شدن ارزش تابع هدف مسئله با رابطه (۴۰) دلیل بر نا تهی بودن فضای جواب بود. همچنین نتایج مربوط به حل بهینه مسائل تک‌هدفه مطابق رابطه (۴۱) در جدول (۳) گزارش شده است. ماتریس بهره‌وری<sup>۴۵</sup> نیز در ادامه تشکیل شده است.

در صورتی که حل بهینه  $k$  مسئله فوق یکسان باشد، توابع هدف جهت‌گیری بهینه کاملاً یکسانی دارند و جواب حاصل، راه‌حل بهینه مسئله چندهدفه است. در غیر این صورت باید با استفاده از روش‌های MODM مسئله را حل کرد.

۳-۶- اجرای شدنی بودن مسئله و تحلیل هدف‌ها

با استفاده از نرم‌افزار GAMS سئور CPLEX فضای شدنی مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی



جدول ۳- حل بهینه مسائل تک‌هدفه

تابع هدف	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
مقدار تابع هدف	۲۵۶۱۴۹۸/۰۶۴	۶۵/۷۶	۰/۳۷۴	۱۲/۷۶۳	۴/۵۲۵	۳۶۷۵/۵۹۱	۱/۱۵۹	۱۱۶۸/۴۷۲
مکان‌ها	۱۴، ۱۲، ۴ و ۱۷	۱۲، ۱۱ و ۲۵	۱۳، ۱۰ و ۲۰	۱۶، ۹-۱۱ و ۲۰، ۲۲	۲۱، ۱۹، ۱۷، ۱۵ و ۲۴ و ۲۵	۱۸، ۱۱-۱۵ و ۲۱، ۲۴ و ۲۵	۲۲، ۲۰، ۱۹، ۱۴ و ۲۳	۱۳-۱۶، ۱۱ و ۱۹-۲۵

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
$f_1$	2561498.064	71.59	1.300	20.632	7.653	4427.923	1.406	1405.704
$f_2$	$8.1840 \times 10^6$	65.76	2.769	54.057	9.384	12733.873	4.042	4042.478
$f_3$	$4.1912 \times 10^6$	69.20	0.374	13.545	6.371	4218.44	1.329	1339.188
$f_4$	$4.1392 \times 10^6$	69.20	0.447	12.763	6.336	3838.264	1.209	1218.497
$f_5$	$4.3975 \times 10^6$	69.03	1.258	20.539	4.525	4873.990	1.545	1547.267
$f_6$	$3.6533 \times 10^6$	69.23	0.973	15.968	7.728	3675.591	1.166	1170.878
$f_7$	$3.7840 \times 10^6$	69.19	0.999	15.909	7.796	3688.488	1.159	1169.178
$f_8$	$4.1222 \times 10^6$	69.18	1.037	16.034	7.901	3680.615	1.168	1168.472

پژوهش از روش محدودیت- $\epsilon$ <sup>۵۲</sup> استفاده شد. اثبات شده است که جواب منحصر به فرد حاصل از این روش، جواب کارا است (وانگ و مسعود، ۱۹۷۹؛ میتینن، ۱۹۹۹). شایان ذکر است که در این روش نظر DM بعد از حل اعمال می‌شود.

#### ۶-۵- روش محدودیت- $\epsilon$

در این روش از بین  $k$  تابع هدف موجود یکی از اهداف برای کمینه‌شدن انتخاب و  $(k-1)$  هدف دیگر به شکل  $f_j(x) \leq \epsilon_j$  به محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی اضافه می‌شود.  $\epsilon_j$  پارامتری است که حد بالای مقدار تابع هدف  $f_j$  را مشخص می‌کند. با فرض انتخاب تابع هدف  $i$  ام  $(f_i(x))$  برای کمینه‌شدن، مدل به شکل رابطه (۴۲) درمی‌آید.

$$\begin{aligned} \min f_i(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) &\leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ f_j(x) &\leq \epsilon_j \quad j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, k \end{aligned} \quad (42)$$

همان‌طور که از جدول ۳ و ماتریس بهره‌وری بالا پیداست، حل بهینه مسائل تک‌هدفه یکسان نیست، پس مسئله یک راه‌حل بهینه ندارد و باید از روش‌های MODM استفاده کرد.

#### ۶-۴- روش‌های MODM

روش‌های MODM از نظر سطح دخالت تصمیم‌گیرنده ( $DM^{k6}$ ) به چهار دسته تقسیم می‌شود: ۱. روش‌های بدون در نظر گرفتن DM، ۲. روش‌هایی که قبل از حل، اطلاعات اولیه از DM گرفته می‌شود، ۳. روش‌های تعاملی<sup>۴۷</sup> و ۴. روش‌هایی که نظر DM بعد از حل اعمال می‌شود. از نظر دیگر روش‌های MODM به دو دسته کلی زیر قابل تقسیم است: ۱. روش‌هایی که به راه‌حل‌های رضایت‌بخش<sup>۴۸</sup> منجر می‌شود و ۲. روش‌هایی که به راه‌حل‌های کارا (مؤثر<sup>۴۹</sup>) ناچیره و غیرمسلط<sup>۵۰</sup>، بهینه پارتو<sup>۵۱</sup> می‌انجامد. در این

فضای جواب و سادگی روش (نصوحی و حجازی، ۲۰۱۱؛ دب، ۲۰۰۹).

#### ۶-۶- اجرای روش محدودیت- $\epsilon$

تابع هدف اول ( $f_1$ ) یعنی مجموع هزینه‌ها برای کمینه‌شدن انتخاب و مابقی توابع هدف به محدودیت برده شدند. با استفاده از نرم‌افزار GAMS الگوریتم بهینه‌ساز CPLEX با انتخاب مقادیر  $\epsilon$  مختلف مطابق جدول ۴ جواب کارای مختلف به دست آورده شد. مقادیر  $\epsilon$  ها با توجه به جدول ۳، یعنی حل بهینه مسائل تک‌هدفه انتخاب شدند. نتایج حاصل از حل و نیز زمان حل در جدول ۵ منعکس شده است.

با تغییر  $\epsilon$  می‌توان به جواب‌های کارای مختلف رسید. سرانجام پس از به‌دست‌آوردن جواب کارای کافی، DM جواب مرجح<sup>۳</sup> (برتر) را از بین جواب‌های کارای یافت‌شده انتخاب می‌کند. این انتخاب معمولاً براساس وزن اهداف مختلف از نظر DM و براساس روش‌های MADM انجام می‌شود. از ضعف‌های روش محدودیت- $\epsilon$  می‌توان به ابهام در انتخاب مقادیر هر یک از  $\epsilon$ ها اشاره کرد. همچنین امکان دنبال‌کردن جواب کارای رأسی در این روش آسان نیست. از جمله محاسن این روش عبارت است از: امکان استفاده در مسائل با فضای هدف محدب و نامحدب، توانایی تولید جواب‌های کارای گوناگون در بخش‌های مختلف

جدول ۴- انتخاب مقادیر مختلف برای  $\epsilon$ ها برای هر جواب کارا

جواب کارا	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$
۱	۷۰	۱	۱۸	۷/۵	۴۸۰۰	۱/۵	۱۶۵۰
۲	۶۹	۱/۵	۱۶	۸	۴۲۰۰	۱/۷۵	۱۳۰۰
۳	۶۸	۱/۳	۲۰	۷	۴۵۰۰	۲	۲۰۰۰
۴	۶۸	۱/۵	۱۸	۷/۵	۴۲۰۰	۲	۲۰۰۰
۵	۶۹	۱/۳	۱۸	۷	۴۸۰۰	۲	۱۳۰۰
۶	۶۹	۱/۵	۲۰	۸	۴۲۰۰	۱/۷۵	۱۶۵۰
۷	۷۰	۱	۱۶	۷/۵	۴۵۰۰	۱/۵	۱۳۰۰
۸	۶۸	۱/۵	۱۶	۸	۴۲۰۰	۱/۷۵	۱۶۵۰
۹	۷۰	۱	۱۶	۸	۴۸۰۰	۱/۵	۲۰۰۰
۱۰	۶۹	۱/۳	۲۰	۷	۴۵۰۰	۲	۱۶۵۰

جدول ۵- جواب کارای به‌دست‌آمده از روش محدودیت- $\epsilon$

جواب کارا	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	زمان حل (ثانیه)
۱	۲۶۹۵۷۹۹/۹۴۴۵۳	۶۹/۹۶	۰/۹۴۳	۱۷/۹۴۲	۷/۱۸۹	۴۱۲۵/۳۱۲	۱/۳۰۵	۱۳۰۹/۶۳۵	۲۸۹
۲	۲۸۴۹۲۲۳/۰۷۷۸۸	۶۸/۸۹	۰/۸۱۸	۱۶/۰۰۰	۶/۷۹۴	۳۹۷۶/۵۵۸	۱/۲۶۵	۱۲۶۲/۴۰۳	۲۹۶
۳	۲۷۰۳۵۰۹/۹۹۲۴۶	۶۸/۰۰	۱/۱۶۱	۲۰/۰۰۰	۷/۰۰۰	۴۳۷۹/۶۱۶	۱/۳۸۹	۱۳۹۰/۳۶۳	۳۱۲
۴	۲۷۲۲۱۴۵/۴۷۱۷۵	۶۸/۰۰	۰/۹۸۴	۱۷/۸۳۰	۶/۹۴۷	۴۱۶۶/۶۱۵	۱/۳۱۸	۱۳۲۲/۷۴۱	۲۶۲
۵	۲۷۵۱۳۷۱/۸۲۴۵۵	۶۸/۸۰	۰/۹۵۲	۱۸/۰۰۰	۷/۰۰۰	۴۰۹۴/۹۶۷	۱/۲۹۶	۱۳۰۰/۰۰۰	۳۰۱
۶	۲۶۷۶۸۳۹/۳۴۵۲۲	۶۹/۰۰	۱/۱۹۳	۱۹/۴۱۷	۸/۰۰۰	۴۲۰۰/۰۰۰	۱/۳۳۴	۱۳۳۳/۳۵۸	۲۴۹
۷	۲۹۰۰۴۵۷/۲۰۷۴۷	۶۹/۷۷	۰/۷۷۶	۱۶/۰۰۰	۶/۷۵۹	۴۰۰۶/۲۵۴	۱/۲۶۵	۱۲۷۱/۸۳۲	۲۹۹
۸	۲۷۸۷۷۴۳/۴۵۵۷۸	۶۸/۰۰	۰/۸۲۴	۱۵/۷۳۶	۶/۸۲۳	۳۹۴۵/۴۰۸	۱/۲۴۶	۱۲۵۲/۵۱۴	۳۴۸
۹	۲۹۰۰۴۵۷/۲۰۷۲۱	۶۹/۹۴	۰/۷۷۶	۱۶/۰۰۰	۶/۷۵۹	۴۰۰۶/۲۵۴	۱/۲۶۵	۱۲۷۱/۸۳۲	۲۸۳
۱۰	۲۶۵۳۶۱۱/۹۵۴۴۸	۶۹/۰۰	۱/۱۹۲	۱۹/۸۷۱	۷/۰۰۰	۴۳۵۸/۷۳۵	۱/۳۸۳	۱۳۸۳/۷۳۴	۳۱۹

جدول ۵ مانند یک ماتریس تصمیم‌گیری است که سطرها گزینه‌های مختلف‌اند و ستون‌ها شاخص‌های مختلف‌اند. هریک از درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری فوق  $r_{ij}$  نامیده شد. روش بی‌مقیاس‌سازی فازی مطابق رابطه (۴۳) روی این ماتریس اعمال شد. مقیاس اندازه‌گیری در این بی‌مقیاس‌سازی بین صفر و یک خواهد بود طوری که صفر برای بدترین و یک برای بهترین نتیجه

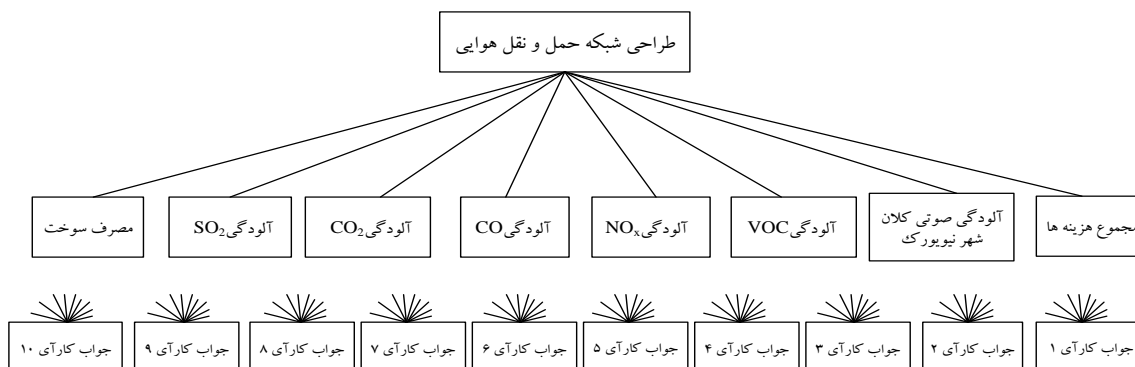
$$n_{ij} = \frac{\max_i r_{ij} - r_{ij}}{\max_i r_{ij} - \min_i r_{ij}} \quad (43)$$

جدول ۶- ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس‌شده

جواب کارا	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
۱	۰/۸۳	۰/۰۱	۰/۶۰	۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹
۲	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳
۳	۰/۸۰	۱/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۸۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	۰/۷۲	۱/۰۰	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۸۵	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۴۹
۵	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۸۱	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۶
۶	۰/۹۱	۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۴۱
۷	۰/۰۰	۰/۰۹	۱/۰۰	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۶
۸	۰/۴۶	۱/۰۰	۰/۸۸	۱/۰۰	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۶
۱۰	۱/۰۰	۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵

سپس مطابق شکل ۳ ساختار سلسله‌مراتبی زیر در نظر گرفته شد. برای انتخاب راه‌حل برتر از AHP گروهی استفاده شد. ده نفر از خبرگان این حوزه از محققان دانشکده هوانوردی و فضانوردی دانشگاه MIT و نیز اداره محیط‌زیست و انرژی سازمان هوانوردی فدرال آمریکا ماتریس مقایسات زوجی اهمیت معیارها نسبت

به طراحی شبکه حمل و نقل هوایی را تهیه کردند. با فرض اهمیت یکسان نظرات با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice، ماتریس‌های گفته‌شده یکپارچه شدند و درنهایت ماتریس اوزان شاخص‌ها به دست آورده شد. این ماتریس زیر شکل ۳ قابل مشاهده است.



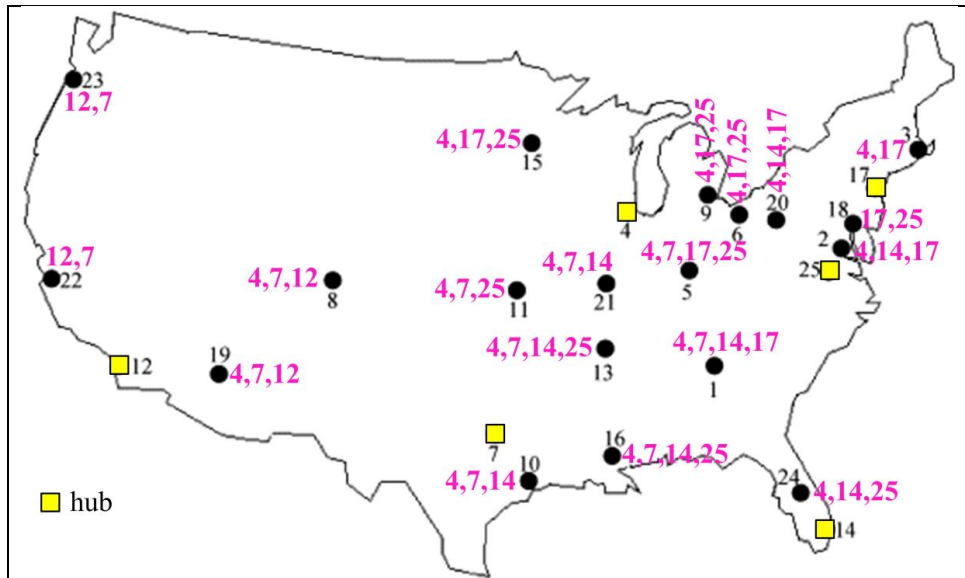
شکل ۳- ساختار سلسله‌مراتبی

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
Goal	0.08	0.07	0.12	0.20	0.14	0.11	0.16	0.13

هاب‌و‌کمان حاصل از جواب برتر انتخاب شده را نشان می‌دهد. اعداد بنفش رنگ در کنار گره‌های غیرهاب نشان می‌دهد که به چه هاب‌هایی متصل شده‌اند.

با ضرب ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس شده در ماتریس اوزان شاخص‌ها ماتریس زیر نتیجه می‌شود. با توجه به این ماتریس نهایی جواب کارای هشتم به‌عنوان راه‌حل برتر انتخاب می‌شود. شکل ۴ شبکه

Goal	Solution1	Solution2	Solution3	Solution4	Solution5	Solution6	Solution7	Solution8	Solution9	Solution10
	0.56	0.86	0.26	0.61	0.63	0.29	0.80	0.95	0.79	0.25



شکل ۴- جواب برتر

که در این رابطه،  $T_{ij}$ : جریان برحسب مسافر از گره  $i$  به گره  $j$ ،  $P_i$ : جمعیت گره  $i$ ،  $P_j$ : جمعیت گره  $j$ ،  $d_{ij}$ : مسافت بین گره‌های  $i$  و  $j$ ،  $k$ : ثابت تناسب و  $x$ : عدد کالیبره شده به‌عنوان یک عامل بازدارنده سفر است. مقدار  $x$  می‌تواند بین  $1/3$  تا  $1/8$  باشد. مرکز آمار ایران در قالب طرح سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰)، داده‌های مربوط به جمعیت در سال ۱۳۹۰ را منتشر کرده است. با توجه به اطلاعات گرفته شده از مدیریت فرودگاه اصفهان در سال ۱۳۹۰ جریان برحسب مسافر از اصفهان به تهران برابر  $249365$  نفر بوده است. حال با فرض اینکه مقدار  $x$  برابر میانگین کمینه و بیشینه بازدارندگی یعنی  $1/55$  انتخاب شود، می‌توان ثابت تناسب  $k$  را به‌صورت زیر تخمین زد:

#### ۷- شبکه هاب‌و‌کمان کشور ایران

شبکه داخلی هوایی کشور ایران در سال ۱۳۹۰ جهت اجرا انتخاب شد که دارای ۴۷ گره (فرودگاه) است (شکل ۳).

جهت اجرای مدل پیشنهادی نیاز به دو ماتریس مسافت و جریان بین گره‌ها است. ماتریس مسافت بین گره‌ها روی شبکه اینترنت در دسترس است<sup>۴</sup>. جهت به‌دست آوردن ماتریس جریان از مدل جاذبه استفاده شد. این مدل عمومی‌ترین و گسترده‌ترین مدل کاربردی از سال ۱۹۴۳ برای تعیین توزیع سفرهای هوایی است که جریان بین هر جفت از فرودگاه‌های مبدأ و مقصد را تخمین می‌زند (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). رابطه اصلی مدل جاذبه به‌شکل زیر است:

$$T_{ij} = \frac{kP_iP_j}{d_{ij}^x} \quad (44)$$

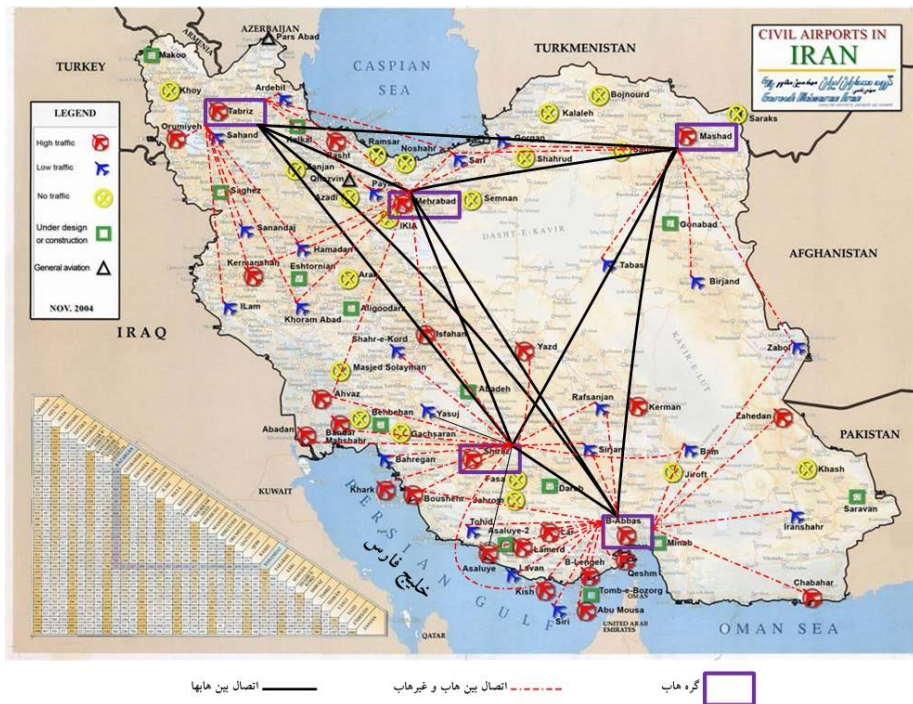
$$i = \text{Isfahan} \quad j = \text{Tehran}, \quad P_i = 4879312, \quad P_j = 12183391, \quad x = 1.55,$$

$$d_{ij} = 439000m, \quad T_{ij} = 249365 \xrightarrow{\text{رابطه (44)}} k = \frac{T_{ij} d_{ij}^x}{P_i P_j} \Rightarrow k = 2.34$$

حال با داشتن ثابت تناسب  $k$  و عدد کالیبره شده  $x$ ، جمعیت گره‌ها و مسافت بین آنها طبق رابطه (۱۸)، ماتریس جریان قابل تخمین است. هواپیماها نیز مطابق جدول ۲ انتخاب شدند. مطابق مدل و روش حل ارائه شده، شبکه داخلی حمل و نقل هوایی هاب و کمان کشور ایران به صورت شکل ۵ ارائه می شود.



شکل ۵- شبکه داخلی حمل و نقل هوایی ایران



شکل ۶- شبکه حمل و نقل هوایی هاب و کمان ایران

## ۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

توسعه مدل‌های ریاضی جدید مطابق با مشکلات زندگی واقعی انسان‌ها از خلاءهای مطالعاتی در زمینه مسائل مکان‌یابی هاب است. امروزه تعیین ساختار شبکه هاب‌و‌کمان شرکت‌های هواپیمایی با توجه به چالش‌های پیش روی صنعت حمل‌ونقل هوایی تنها با در نظر گرفتن معیار هزینه کافی نیست. بدین منظور در این مقاله مدل چندهدفه‌ای برای مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و بدون محدودیت ظرفیت ارائه شد. در این مدل چندهدفه برای اولین بار مجموع میزان آلاینده‌های تولیدی و سوخت مصرفی هواپیماها و آلودگی صوتی فرودگاه‌ها ناشی از نشست و برخاست هواپیماها علاوه بر معیار هزینه در نظر گرفته شد. رویکرد جدید دیگر این پژوهش لحاظ کردن تنوع هواپیماها در مسئله مکان‌یابی هاب است. بدین ترتیب مشکل طراحی شبکه براساس جریان مسافران و جریان هواپیما برطرف شد. این پژوهش نقطه عطفی در جهت نزدیک‌تر کردن مسائل مکان‌یابی هاب با مشکلات زندگی واقعی انسان‌ها است و برای اولین بار حوزه‌های سلامت و انرژی را وارد این مسائل می‌کند. همچنین در نهایت با توجه به مدل و روش حل ارائه‌شده، شبکه داخلی حمل‌ونقل هوایی هاب‌و‌کمان کشور ایران ارائه شد.

آزاد کردن فرض‌هایی چون نبود مسیرهای مستقیم بین گره‌های غیرهاب یا گراف کامل بودن شبکه حاصل از اتصال گره‌های هاب، در نظر گرفتن توابع پلکانی برای ضریب تخفیف بخش انتقال به‌جای ثابت بودن آن به‌ازای جریان‌های مختلف، در نظر گرفتن هدف‌های دیگری چون زمان سفر و تعمیم مدل ارائه‌شده به حوزه‌ای غیر از حمل‌ونقل هوایی چون پست و

ارتباطات از راه دور با توجه به توابع هدف مخصوص به آن حوزه می‌تواند پیشنهادات آتی برای توسعه پژوهش پیش رو باشد.

## مراجع

ابراهیم‌زاده، عیسی؛ سقایی، محسن؛ ایزدفر، الهام و ایزدفر، نجمه (۱۳۹۰). مدل تحلیلی برنامه‌ریزی تولید سفر و حمل‌ونقل هوایی در کشور مطالعه موردی: فرودگاه بین‌المللی شهید بهشتی اصفهان، فصلنامه مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، ۳(۱۰)، ۸۱-۹۴.

مرکز آمار ایران (۱۳۹۰). گزیده نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۰، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ریاست جمهوری.

Alumur, S., Kara, B.Y. (2008). Network hub location problem: The state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190, 1-21.

Aykin, T. (1994). Lagrangian relaxation based approaches to hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operation Research*, 79, 501-523.

Campbell, J.F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problem. *European Journal of Operational Research*, 72, 387-405.

Cánovas, L., García, S., Marín, A. (2007). Solving the uncapacitated multiple allocation hub location problem by means of a dual-ascent technique. *European Journal of Operational Research*, 179, 990-1007.

Chen, J.F. (2007). A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Omega*, 35, 211-220.

Costa, M.G., Captivo, M.E., Clímaco, J. (2008). Capacitated single allocation hub location problem – a bi-criteria approach. *Computer and Operations Research*, 35, 3695-3671.

- Cunha, C.B., Silva, M.R. (2007). A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil. *European Journal of Operational Research*, 179, 747-758.
- Damgacioglu, H., Dinler, D., Ozdemirel, N.E., Iyigun, C., (in press). A genetic algorithm for the uncapacitated single allocation planar hub location problem, *Computers & Operations Research*.
- Deb, K. (2009). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Chichester.
- de Neufville, R., Odoni, A.R. (2003). *Airport Systems: Planning, Design, and Management*. McGraw-Hill, New York.
- Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., Boland, N. (2000). The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms. *European Journal of Operational Research*, 120, 614-631.
- EEA/EMEP (2010). *Emission Inventory Guidebook*.
- EIA (2010). *International Energy Outlook 2010*.
- EIA (2011). *International Energy Outlook 2011*.
- Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location Science* 4, 139-154.
- Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M. (1998). Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem. *European Journal of Operational Research*, 104, 100-122.
- Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M. (1999). Solution algorithm for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of Operation Research*, 86, 141-159.
- FAA (1979). *FAA Statistical Handbook of Aviation*. University of Michigan, US Department of Transportation.
- FICON, Federal Interagency Committee on Noise (1992). *Federal agency review of selected airport noise analysis issues*.
- Hwang, C.L., Masud, A.S. (1979). *Multiple Objective Decision Making-Methods and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- ICAO (1993). *International Standards and Recommended Practices. Environmental Protection Annex 16, Volume II Aircraft Engine Emissions*, second ed.
- Karimi, H., Setak, M. (2014). Proprietor and customer costs in the incomplete hub location-routing network topology. *Applied Mathematical Modelling*, 38, 1011-1023.
- Mahashabde, A., Wolfe, P., Ashok, A., Dorbian, C., He, Q., Fan, A., Lukachko, S., Mozdzanowska, A., Wollersheim, C., Barrett, S.R.H., Locke, M., Waitz, I.A. (2011). Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. *Progress in Aerospace Sciences*, 47, 15-52.
- Martí, R., Corberán, Á., Peiró, J. (2015). Scatter search for an uncapacitated p-hub median problem. *Computers & Operations Research*, 58, 53-66.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Nosoohi, I., Hejazi, S.R. (2011). A multi-objective approach to simultaneous determination of spare part numbers and preventive replacement times. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 1157-1166.
- O'Kelly, M.E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32, 393-404.
- Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., Yilmaz, G. (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computer and Operation Research*, 32, 967-984.
- US EPA (2000). *Air quality criteria for carbon monoxide*.

US EPA (2008a). Integrated science assessment for oxides of nitrogen—health criteria.

US EPA (2008b). Integrated science assessment for sulfur oxides—health criteria.

Waitz, I.A., Townsend, J., Cutcher-Gershenfeld, J., Greitzer, E.M., Kerrebrock, J.L. (2004). Aviation and the environment: a national vision statement, framework for goals and recommended actions.

### پی‌نوشت

- 1- Mahashabde
- 2- Waitz
- 3- Campbell
- 4- Aykin
- 5- Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem
- 6- Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem
- 7- Capacitated Single Allocation Hub Location Problem
- 8- Ernst and Krishnamoorthy
- 9- Ebery
- 10- Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem
- 11- Topcuoglu
- 12- Uncapacitated Single Allocation Hub Location Problem
- 13- Silva and Silva
- 14- Chen
- 15- Tabu List
- 16- Cánovas
- 17- Costa
- 18- Iterative approach
- 19- Martí
- 20- scatter search
- 21- Mixed Integer Programming
- 22- Landing and Takeoff
- 23- Cruise
- 24- Taxi-out
- 25- Climb-out
- 26- approach-landing
- 27- taxi-in
- 28- Climb
- 29- descent
- 30- very simple
- 31- Simple
- 32- Detailed
- 33- European Environment Agency
- 34- Single Event measures
- 35- Cumulative measures
- 36- Sound Exposure Level

37- Equivalent Sound level

38- A-weighted decibel

39- Design Peak Day

40- Design Peak Hour

41-

<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/files/phub4.txt>

42- Domestic air passenger

43- داده‌های مربوط به SEL هریک از انواع هواپیماها از آدرس

اینترنتی

<http://www.aircraftnoisemodel.org/index.php/logi>

قابل دریافت است.

44- Goal Programming

45- Tradeoff Matrix

46- Decision Maker

47- interactive

48- Satisfying solution

49- Efficient solution

50- Non dominant solution

51- Pareto optimal solution

52-  $\epsilon$ -constraint

53- Preferred solution

54-

[http://www.ittic.com/DeskTopModules/Contents/assets/reservation\\_guide/distance.htm](http://www.ittic.com/DeskTopModules/Contents/assets/reservation_guide/distance.htm)