

کاهش هزینه‌ی تاخیرات ترافیک هوایی با بکارگیری شبکه‌ی جریان پویا با ظرفیت تصادفی

علی ابراهیم‌نژاد^۱، سید هادی ناصری^{۲*}

^۱گروه ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائمشهر
^۲گروه ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه مازندران، بابلسر

رسید مقاله: ۸۸/۳/۴

پذیرش مقاله: ۸۸/۷/۱۵

چکیده

هدف نهایی کنترل ترافیک هوایی برقراری جریان هواپیمایی کارا با حفظ امنیت عملیات هواپیمایی است. به‌هرحال هدف اصلی امنیت است که به هیچ وجه نمی‌توان آن را نادیده گرفت. تاخیرات ترافیک هوایی زمانی بوجود می‌آید که تقاضا برای فرود آمدن و یا پرواز کردن از ظرفیت موجود تجاوز کند. اثرات این تاخیرات را می‌توان با افزایش ظرفیت یا تعدیل تقاضا کاهش داد. البته افزایش ظرفیت یک راه‌حل خوب اما اقدامی بلند مدت است که با ساخت فرودگاه‌های جدید، توسعه‌ی فرودگاه‌های موجود و روش‌های فرود جدید امکان‌پذیر است. بنابراین، یک تصمیم کوتاه مدت برای کاهش تاخیرات با توجه به امکانات موجود، به یک مدل بهینه‌سازی تاکتیکی نیاز دارد. در این مقاله چارچوب این مدل را که تعمیمی از مدل شبکه جریان پویا با ظرفیت تصادفی است، ارائه می‌دهیم.

کلمات کلیدی: کنترل ترافیک هوایی، شبکه جریان پویا، برنامه‌ریزی تصادفی.

۱ دورنما و ادبیات موضوع

مساله‌ی تراکم در بیشتر فرودگاه‌ها بتدریج می‌تواند به یک مساله‌ی حاد تبدیل شود. هزینه‌ی تاخیر سالانه ناشی از تراکم در خطوط هوایی اروپا در سال ۱۹۸۹ حدود ۵ میلیارد دلار تخمین زده شده است و این هزینه برای خطوط هوایی آمریکا حدود ۲ میلیارد دلار بوده است. از آن‌جا که سود نهایی صنعت خطوط هوایی آمریکا بندرت از یک میلیارد دلار تجاوز می‌کند، می‌توان به اهمیت مساله‌ی تراکم پی برد. هدف نهایی کنترل ترافیک هوایی (ATC) برقراری جریان هواپیمایی کارا با حفظ امنیت عملیات هواپیمایی از طریق سیستم هوایی بین‌المللی (NAC) می‌باشد. به‌هرحال هدف اصلی امنیت است که به هیچ وجه نمی‌توان آن را نادیده گرفت.

*عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: nasseri@umz.ac.ir

علت اصلی تراکم محدودیت ظرفیت می‌باشد. در واقع تأخیرات ترافیک هوایی زمانی به وجود می‌آید که تقاضا برای فرود آمدن و یا پرواز کردن از ظرفیت موجود تجاوز کند. در حالت کلی ظرفیت NAC تحت شرایط آب و هوایی مناسب کافی است. به هر حال آب و هوای نامطلوب تأثیرات شدیدی بر روی ظرفیت NAC دارد. مطابق با آمار سازمان هوایی فدرال (FAA) آمریکا در سال ۱۹۹۳، ۷۲ درصد از تأخیرات بیش از ۱۵ دقیقه به دلیل شرایط آب و هوایی نامطلوب بوده است.

آب و هوای معتدل سبب تراکم در ورودی فرودگاه‌های مقصد می‌شود. اتحادیه‌ی حمل و نقل هوایی (ATA)، تأخیرات ATC را برای خطوط هوایی ATA، همراه با هزینه‌ی ۱/۳۵ بیلیون دلاری که به دلیل تأخیرات مسافرین بوده است، ۲/۳ بیلیون دلار برآورد کرد. بنابراین بهبود اندکی در تأخیرات تراکم ATC، کاهش بزرگی در هزینه‌ی تأخیرات ایجاد می‌کند.

سوالی که مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان تأخیرات را کاهش داد. یک اقدام بلند مدت برای کاهش تأخیرات، افزایش ظرفیت فرود می‌باشد که با ساختن فرودگاه‌های جدید، افزودن باندهای فرود به فرودگاه‌های موجود، به کارگیری هواپیماهای بزرگتر و روش‌های فرود پیشرفته امکان‌پذیر است. به هر حال ساخت فرودگاه‌های جدید بسیار مشکل و هزینه‌بر است، به طوری که از ۲۰ فرودگاهی که بیشترین تأخیرات را در سال ۱۹۹۳ داشته‌اند، تنها شش فرودگاه طرح‌هایی برای ساخت باندهای فرود جدید تا قبل از سال ۲۰۰۰ داشتند. همچنین روش‌های فرود پیشرفته و به کارگیری دستگاه‌های الکتریکی و خودکار نیاز به آموزش و تجهیزات هدایتی دارد که هر دو برای FAA و صنعت خطوط هوایی پرهزینه است.

از طرفی در سال ۱۹۸۲ حدود ۹۶۳،۷۹۴،۴ پرواز توسط خطوط هوایی آمریکا انجام شد و در سال ۱۹۹۲ با یک افزایش ۳۸/۳ درصدی به ۳۲۵،۸۶۶،۶ رسید. FAA پیش‌بینی می‌کند که ۳۸ درصد دیگر بر تعداد پروازها تا سال ۲۰۰۵ افزوده شود. بنابراین با اینکه تلاش برای ساخت امکانات جدید ادامه دارد، این امکانات تنها برای تطبیق با رشد ترافیک موثر است. لذا تکنیک‌های جدید مورد نیاز است تا در کوتاه مدت و با توجه به امکانات موجود بتوان تأخیرات را کاهش داد. مسلم است که تأخیرات را نمی‌توان به طور کامل حذف کرد و لیکن اثرات تأخیرات را می‌توان با به کارگیری تکنیک‌های مدیریتی جریان ترافیک کاهش داد.

سه نوع تکنیک مدیریتی برای کاهش تأخیرات وجود دارد که به معرفی آن‌ها پرداخته و در بخش‌های بعدی نشان داده می‌شود که تکنیک سوم کارا تر است و همچنین تکنیک‌های اول و سوم با به کارگیری تکنیک سوم قابل اجرا می‌باشند. این سه نوع تکنیک عبارتند از:

الف. سیاست عدم کنترل جریان (NFC)

در واقع این تکنیک فاقد هر گونه مدیریت در جریان ترافیک می‌باشد و بدون مدیریت تمامی هواپیماها مطابق با برنامه‌ی زمان‌بندی شده پرواز می‌کنند و وقتی به محدوده‌ی فرودگاه مقصد می‌رسند، امکان دارد ظرفیت باند به اندازه‌ی نباشد که تمام هواپیماها فرود آیند، لذا بیشتر هواپیماها مجبورند در صف طولانی هوایی منتظر بمانند و در نزدیکی ایستگاه تراکم که « ناحیه‌ی انتظار » نامیده می‌شود دور بزنند.

به هر حال نگهداری هواپیما در این ناحیه، به دلیل هزینه‌های مصرف سوخت اضافی، آلودگی هوا و افزایش خطرات غیرمنطقی است و با هدف اصلی *ATC* که افزایش امنیت می‌باشد، مغایرت دارد.

ب. سیاست ابتکاری اولین ورود- اولین سرویس (FCFS)

مرکز فرماندهی سیستم کنترل ترافیک هوایی (ATCSCC) اخیراً تصمیمات مدیریتی عملی برای *NAC* اتخاذ می‌کند. ATCSCC زمان‌های فرود مطابق با سیاست ابتکاری اولین ورود- اولین سرویس در نظر می‌گیرد و برای تطبیق با این زمان‌های فرود، تاخیرات زمینی به پروازها اختصاص می‌دهد. علت اصلی اتخاذ چنین سیاستی این است که تاخیرات زمینی هزینه‌ی کمتری از تاخیرات هوایی دارد و همچنین میزان امنیت را افزایش می‌دهد. در این تکنیک در هر مکان ظرفیت جاری مشخص است و یک پیش‌بینی قطعی برای ظرفیت فرودگاه بعدی وجود دارد. اگر ظرفیت فرودگاه مطابق با ظرفیت پیش‌بینی شده باشد، این سیاست کارایی خواهد بود. به هر حال چون تنها یک پیش‌بینی صورت می‌گیرد، این امکان هست که پیش‌بینی انجام شده خیلی دقیق نباشد که در این صورت بر کیفیت جواب تأثیر منفی می‌گذارد.

البته این مساله که تعیین می‌کند هر هواپیما قبل از پرواز چقدر روی زمین بماند (و نیز حتی المقدور چقدر در هوا بماند و یا در طول پرواز با چه سرعتی حرکت کند) به طوریکه وقتی به مقصد رسید، مجبور نباشد مدت زمان طولانی قبل از فرود در هوا بماند و نیز هزینه‌ی تاخیرات زمینی و هوایی را به حداقل برساند، مساله‌ی تاخیرات زمینی (GHP) نامیده می‌شود.

ج. تکنیک شبکه جریان پویای چند سناریویی (MSDNF)

چارچوب این تکنیک روی یک مدل شبکه جریان مکان- زمان بنا شده است که برخی از کمان‌های آن ظرفیت غیرقطعی دارند. غیرقطعی بودن با یک رویکرد چند سناریویی توصیف می‌شود که هر سناریو یک حالت ممکن از بردار ظرفیت را نشان می‌دهد. روش سناریو دو ویژگی مهم دارد. اولاً قابل اطمینان است، چرا که اجازه‌ی انتخاب سناریوها را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد. برای مثال، تصمیم‌گیرنده می‌تواند سناریویی تولید کند که شامل «بهترین حدس»، «بهترین حالت» و یا «بدترین حالت» ممکن از ظرفیت فرودگاه‌ها باشد. ثانیاً از آنجا که توزیع احتمال ظرفیت فرودگاه‌های بعدی در عمل معلوم نیست، رویکرد سناریو می‌تواند مفید باشد و همچنین به دست آوردن پیش‌بینی‌های ظرفیت فرودگاه‌های بعدی در زمان‌های معین نیاز به پیش‌بینی دقیق وضعیت آب و هوا دارد که با تکنولوژی جاری پیش‌بینی قطعی وضعیت آب و هوا ناممکن است و این رویکرد سناریو را جذاب‌تر می‌سازد.

این مقاله به صورت زیر تدوین شده است. ساختار کلی شبکه جریان پویای تصادفی در بخش دوم آورده می‌شود. در بخش سوم، مسأله‌ی مدیریت ترافیک هوایی در قالب این شبکه مدل‌بندی می‌گردد. در بخش چهارم، داده‌های مورد نیاز برای بررسی تکنیک شبکه جریان پویای چند سناریویی معرفی و در بخش پنجم به تجزیه و تحلیل جواب‌های به دست آمده از مدل‌های مختلف مدیریتی با استفاده از شبیه‌سازی آماری پرداخته می‌شود. سرانجام در بخش ششم نتایج حاصل از آزمایش مدل *MSDNF* در مقایسه با دیگر مدل‌ها بررسی می‌گردد.

۲ شبکه جریان پویای تصادفی

مسائل شبکه جریان پویای تصادفی از حالاتی گفتگو می‌کند که برخی یا تمامی پارامترهای شبکه، به جای کمیت‌های معین با متغیرهای تصادفی (یا احتمالی) بیان می‌شوند. ایده‌ی اصلی در حل این گونه مسائل تصادفی تبدیل آن‌ها به مسائل قطعی معادل است. برای این کار می‌توان از روش برنامه‌ریزی تصادفی با قیدهای تصادفی و یا مدل‌بندی تجمیع سناریو استفاده کرد.

برنامه‌ریزی تصادفی با قیدهای تصادفی در حل مسائل مشتمل بر قیدهای تصادفی یعنی قیدهایی که دارای احتمال مشخصی برای نقض شدن هستند، کارایی دارد. به هر حال این روش در مواقعی که توزیع احتمال نامعلوم است، کارایی ندارد.

در جهت رفع این مشکل، مدل‌بندی تجمیع سناریو را برای مسأله‌ی شبکه جریان پویا با ظرفیت کمان تصادفی بیان می‌کنیم که تصادفی بودن را با به کارگیری نمونه به جای توزیع، مدل‌بندی می‌کند. این مدل بخصوص زمانی می‌تواند مفید واقع شود که متغیرهای تصادفی بین دوره‌های مختلف وابسته به زمان باشند.

تعریف ۱ شبکه جریان $G=(V, A)$ را پویا می‌نامیم هرگاه هر گره $i \in V$ دارای زمان $t(i)$ بوده و به ازای هر کمان $(i, j) \in A$ داشته باشیم $t(i) < t(j)$.

بنا به تعریف شبکه جریان پویا هر گره i دارای یک زمان $t(i)$ است. با این فرض که $\eta = \{1, 2, \dots, T\}$ مجموعه‌ی دوره‌های زمانی گره‌ها و U_i بردار ظرفیت کمان‌ها در دوره‌ی t ام باشد، $S = \{U_1^s, U_2^s, \dots, U_T^s\}$ یک سناریو نامیده می‌شود که یک حالت ممکن از بردار ظرفیت شبکه را نشان می‌دهد. در مدل تجمیع سناریو فرض می‌کنیم تعداد متناهی سناریو داریم که هر کدام با احتمال مشخصی روی می‌دهند.

شبکه جریان $G=(V, A)$ را در نظر بگیرید که در آن $V = \{1, 2, \dots, n\}$ مجموعه‌ی گره‌های شبکه، $\eta = \{1, 2, \dots, T\}$ مجموعه‌ی دوره‌های زمانی گره‌ها و A مجموعه‌ی کمان‌های شبکه است. در این شبکه ظرفیت کمان‌ها دارای یک متغیر تصادفی گسسته است.

فرض کنید $\Omega = \{1, \dots, K\}$ مجموعه‌ی اندیس سناریوها، u^k بردار ظرفیت سناریوی k و p_k احتمال روی دادن سناریوی k باشد. زمانی که کمان a تحت سناریوی k کران ظرفیت متناهی ندارد، می‌گوئیم $u_a^k = \infty$. فرض می‌شود که ظرفیت کمان $a = (i, j)$ در زمان شروع کمان a یعنی $t(a)$ معلوم می‌گردد.

در واقع تصادفی بودن با رویکردی چند سناریویی توصیف می‌شود که این سناریوها وابسته به زمان هستند و هر سناریو یک حالت ممکن از بردار ظرفیت کمان را مشخص می‌کند. لذا قبل از ارایه مدل منظورمان را از وابستگی سناریوها به زمان بیان می‌کنیم.

فرض کنید $A_t = \{a \in A : t(a) \leq t\}$ زیر مجموعه‌ای از A باشد که قبل از زمان t شروع می‌شود. به ازای هر $k \neq k'$ ، دو سناریوی k و k' را غیرقابل تشخیص گوئیم هرگاه به ازای هر $a \in A_t$ ظرفیت کمان a تحت هر دو سناریوی k و k' یکی باشد. حال اگر $\tau(k, k')$ آخرین زمانی باشد که سناریوهای k و k' غیرقابل تشخیص می‌شوند، آنگاه؛ $\tau(k, k') = \max\{t : u_a^k = u_a^{k'} ; \forall a \in A_t\}$. این بدان معنی است که ظرفیت هر کمانی که زمان

شروع آن کمتر یا مساوی $\tau(k, k')$ باشد، تحت سناریوی k و k' یکسان است و حداقل یک کمان با زمان شروع $\tau(k, k') + 1$ وجود دارد که ظرفیت متفاوتی تحت سناریوهای k و k' دارد.

فرض کنید x^k بردار جریان تحت سناریوی k ، c بردار هزینه و N ماتریس وقوع گره-کمان شبکه‌ی G باشد. گره‌ی ۱ را مبداء و گره‌ی n را مقصد منحصر به فرد می‌گیریم. علاوه بر این فرض می‌کنیم مسأله به گونه‌ای است که دقیقاً v واحد عرضه در گره‌ی ۱ و v واحد تقاضا در گره‌ی n وجود دارد. بنابراین $b_1 = -v$ ، $b_n = v$ ، و برای هر $b_i = 0$ ، $i \in V \setminus \{1, n\}$.

با این توصیف مدل جمع سناریو متناظر با شبکه جریان پویا به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \min \sum_k p_k (c x^k) \\ \text{s.t. } \quad Nx^k = b \quad \forall k & \quad (1-1) \\ x^k \leq u^k \quad \forall k & \quad (2-1) \\ x_a^k - x_a^{k'} = 0 \quad \forall a \in A; \forall k, k': t(a) \leq \tau(k, k') & \quad (3-1) \\ x^k \geq 0 \quad \forall k & \quad (4-1) \end{aligned} \quad (1)$$

در (۱)، (۱-۱) قیود بقای جریان، (۲-۱) قیود ظرفیت، (۳-۱) قیود غیرقابل پیش‌بینی و (۴-۱) قیود نامنفی نامیده می‌شوند. قیود غیرقابل پیش‌بینی بر این دلالت می‌کند که وقتی دو یا چند سناریو غیرقابل تشخیص باشند، یک تصمیم نمی‌تواند پیش‌بینی کند کدام سناریو روی می‌دهد. بدون از دست دادن کلیت فرض می‌شود که تمام سناریوها در دوره‌ی زمانی نخست، غیرقابل تشخیص هستند. برای مثال ساختار یک مسأله‌ی شبکه جریان با دو سناریو در الگوی ۱ آمده است.

$$\begin{aligned} \min p_1 (c_x x_1 + c_y y_1) + p_2 (c_x x_2 + c_y y_2) \\ \text{s.t. } \quad N_x x_1 + N_y y_1 = b & \quad (2) \\ N_x x_2 + N_y y_2 = b & \quad (3) \\ 0 \leq x_1 \leq k_x & \quad (4) \\ 0 \leq y_1 \leq k_{y_1} & \quad (5) \\ 0 \leq x_2 \leq k_x & \quad (6) \\ 0 \leq y_2 \leq k_{y_2} & \quad (7) \\ 0 \leq x_1 - x_2 = 0 & \quad (8) \end{aligned}$$

الگوی ۱: مسأله‌ی شبکه جریان پویای دو سناریویی

سناریوهای ظرفیت (k_x, k_{y_1}) و (k_x, k_{y_2}) می‌باشند. قیود (۲)، (۴)، (۵) و متغیرهای x_1 و y_1 متناظر با زیرمسأله‌ی شبکه جریان مربوط به سناریوی اول هستند. و قیود (۳)، (۶)، (۷) و متغیرهای x_2 و y_2 با زیرمسأله‌ی شبکه جریان مربوط به سناریوی دوم متناظر هستند.

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم سناریوها در آغاز یکسان می‌باشند، بنابراین تصمیمی که تحت این دو سناریو اتخاذ می‌شود باید غیرقابل پیش‌بینی بودن سناریوها را در دوره‌ی زمانی نخست، منعکس کند. در واقع قیود غیر قابل پیش‌بینی (۸) تضمین می‌کند که تصمیمات نخستین دوره‌ی زمانی، یکسان هستند. گلاکتر در سال ۲۰۰۰ ساختار کلی مساله‌ی شبکه جریان چند سناریویی را بیان نمود [۳]. سپس در سال ۲۰۰۱ الگوریتم‌هایی برای حل این مساله ارائه داد [۲].

۳ مدل‌سازی مساله‌ی ترافیک با استفاده از شبکه جریان پویای تصادفی

در این بخش رویکرد ما به بهینه‌سازی تاخیرات تراکم هوایی بر روی یک مدل شبکه جریان پویای مکان-زمان بنا شده است. هم‌زمان انواع مختلفی از تصمیمات مدیریتی نظیر افزایش و یا کاهش سرعت هواپیما در مسیر می‌تواند در مدل شبکه جریان پویا گنجانده شود. این مدل باید با یک مساله‌ی برنامه‌ریزی صحیح حل شود چرا که تصمیمات تاخیری را نمی‌توان برای کسری از هواپیما اتخاذ کرد.

فرض می‌کنیم $L = \{1, 2, \dots, l\}$ مجموعه‌ی مکان‌های مختلف، متشکل از فرودگاه مبدأ، باند اصلی فرودگاه مقصد، ناحیه‌ی انتظار و بخشی از فضای هوایی باشد. و $\eta = \{1, 2, \dots, T\}$ یک مجموعه‌ی مرتب از دوره‌های زمانی باشد. برای مثال η می‌تواند مجموعه‌ای از ۶۴ دوره‌ی زمانی به طول ۱۵ دقیقه باشد که بخشی از روز از ۷ صبح الی ۱۱ شب (۱۶ ساعت) را نشان می‌دهد که بیشتر پروازها در این بازه‌ی زمانی انجام می‌شود.

برخی از مکان‌ها در L تراکم می‌باشند که باند اصلی فرودگاه مقصد و ناحیه‌ی انتظار را نمایش می‌دهد. برای هر مکان تراکم شده‌ی l_i مجموعه‌ی L به دو مکان l'_i و l''_i تقسیم می‌شود.

مجموعه‌ای از گره‌های $V = L \times \eta$ به وجود می‌آوریم که هر گره‌ی $n_j = (l_j, t_j)$ به مکان l_j در زمان t_j اشاره دارد و هر کمان $a \in A$ بصورت $a = \langle (l_{i_1}, t_{j_1}), (l_{i_2}, t_{j_2}) \rangle$ می‌باشد که در آن به ازای هر $a \in A$ ، $t_{j_2} > t_{j_1}$. در این شبکه پنج نوع کمان وجود دارد که عبارتند از:

الف کمان پرواز: کمان پرواز از گره‌ی (l_{i_1}, t_{j_1}) به گره‌ی (l_{i_2}, t_{j_2}) تعریف می‌شود، هرگاه پرواز از مکان l_{i_1} به مکان l_{i_2} به زمان $t_{j_2} - t_{j_1}$ نیاز داشته باشد.

ب کمان تأخیر: این کمان از گره‌ی (l_i, t_j) به گره‌ی $(l_i, t_j + 1)$ تعریف می‌شود، هرگاه پرواز هواپیما در مکان l_i با تأخیر انجام شود.

ج کمان محدودیت: کمان محدودیت برای مکان تراکم i بصورت یک کمان از گره‌ی (l'_i, t_j) به گره‌ی (l''_i, t_j) تعریف می‌شود. کمان‌های محدودیت در واقع میزان تراکم را در ناحیه‌ی انتظار نشان می‌دهند. این کمان‌ها ظرفیت غیرقطعی دارند.

د کمان مقصد: این کمان از گره‌ی (l_i, t_j) به گره‌ی $(l_i, T+1)$ تعریف می‌شود، هرگاه l_i یک مقصد باشد.

ه کمان مازاد: این کمان از گره‌ی (l_i, T) به گره‌ی $(l_i, T+1)$ تعریف می‌شود.

از کمان مازاد زمانی استفاده می‌شود که یک هواپیما تأخیری بیش از دوره‌ی تراکم داشته باشد. کمان‌های مقصد و مازاد از نوع کمان‌های مصنوعی می‌باشند. کمان‌های محدودیت ظرفیت متناهی دارند تا میزان تراکم را در مکان i مدل‌بندی کنند. پنج نوع کمان موجود در شبکه در جدول ۱ آمده است.

نوع کمان	فرم	هزینه	ظرفیت	ملاحظات
پرواز	$\langle (l_{i_1}, t_{j_1}), (l_{i_2}, t_{j_2}) \rangle$	۰	نامتناهی	$t_{j_2} > t_{j_1}, l_{i_1} \neq l_{i_2}$
تأخیر	$\langle (l_j, t_j), (l_j, t_{j+1}) \rangle$	معمولاً مثبت	نامتناهی	
محدودیت	$\langle (l_j, t_j), (l_j^*, t_{j+1}) \rangle$	۰	متناهی	تصادفی است
مقصد	$\langle (l_i, t_j), (l_i, T+1) \rangle$	۰	نامتناهی	l_i یک مکان مقصد است
مازاد	$\langle (l_{i_1}, T), (l_{i_2}, T+1) \rangle$	۰	نامتناهی	$l_{i_1} \neq l_{i_2}$

جدول ۱: انواع کمان‌ها

پروازها متناظر با جریان در شبکه هستند و هر پرواز با یک کالا (جفت مبدأ- مقصد) متناظر می‌شود. گره‌ی مبدأ شبکه با مکان شروع و زمان خروج پرواز متناظر است. همچنین هر پرواز (کالا) یک مکان مقصد معینی دارد، ولی ممکن است چندین کاندیدای مختلف در زمان‌های فرود داشته باشد.

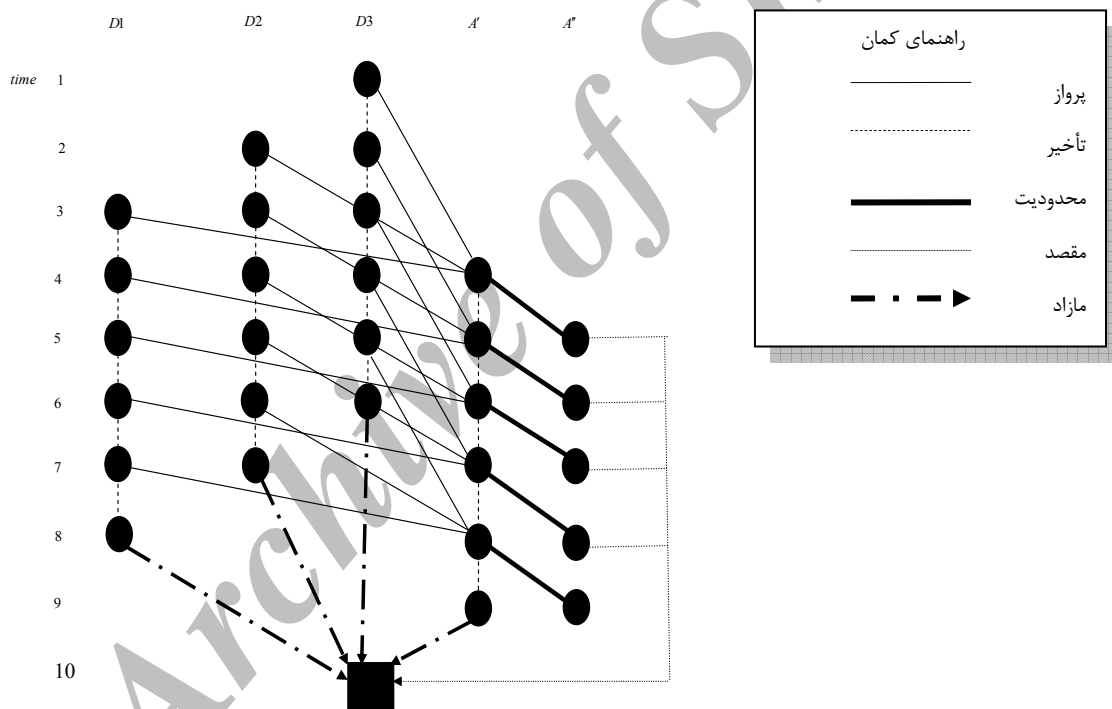
هر مکان مقصد l_e توسط کمان $\langle (l_e, t), (l_e, T+1) \rangle$ به گره‌ی نهایی $(l_e, T+1)$ متصل می‌شود. این کمان‌های مقصد ظرفیت نامتناهی و هزینه‌ی صفر دارند و تضمین می‌کنند که هر پرواز سرانجام به مقصدش می‌رسد. علاوه بر این کمان‌های مازاد $\langle (l_s, T), (l_e, T+1) \rangle$ با ظرفیت نامتناهی برای هر جفت l_s و l_e وجود دارد. ترکیب کمان‌های تأخیر و مازاد تضمین می‌کند که هر مسأله علی‌رغم تصادفی بودن ظرفیت، جواب‌شده‌ی دارد.

یک مثال برای مسأله‌ی تاخیرات زمینی در شکل ۱ آمده است. در این مثال، $D1, D2$ و $D3$ شهرهایی را نشان می‌دهند که به ترتیب یک، دو و سه ساعت با مقصد فاصله دارند. جریان از گره‌های $D1, D2$ و $D3$ پروازها را نشان می‌دهد. هواپیماها به فرودگاه متراکم A پرواز می‌کنند. گره‌های A به دو گره A' و A'' شکافته می‌شود که A' ناحیه‌ی انتظار و A'' باند اصلی فرودگاه را نشان می‌دهد، لذا کمان‌ها از A' به A'' فرآیند فرود را نشان می‌دهند. دو نوع کمان تأخیر در شبکه وجود دارد که تاخیرات هوایی و زمینی را نشان می‌دهند.

توجه داریم که گره‌های $(D1, 8), (D2, 7)$ و $(D3, 6)$ گره‌های مبدا نیستند. این گره‌ها همراه با کمان‌های مازاد وضعیت را نشان می‌دهند که پروازها در زمانی دیرتر از دوره‌ی تراکم صورت گیرد. مقصد نهایی گره‌ی مربعی است که در واقع همان گره‌ی $(A'', 10)$ است. برای مثال یک پرواز دو ساعته را در نظر بگیرید که در ساعت سه بعد از ظهر انجام می‌شود. این پرواز در شبکه به عنوان یک واحد جریان از گره‌ی $(D2, 3)$ نمایش داده شده است. در ساعت سه بعد از ظهر یا هواپیما به موقع حرکت می‌کند و یا با تأخیر زمینی یک دوره‌ی مواجه می‌شود.

در مدل شبکه، حرکت به موقع با کمان $\langle (D2,3), (A',5) \rangle$ و تأخیر زمینی یک دوره‌ای با کمان $\langle (D2,3), (D2,4) \rangle$ نمایش داده شده‌اند. با این فرض که پرواز به موقع صورت گیرد، در ساعت پنج بعد از ظهر هواپیما به ناحیه‌ی انتظار می‌رسد که با گره‌ی $(A',5)$ مدل‌بندی شده است. اگر ظرفیت باند کافی باشد، هواپیما فرود می‌آید که ظرفیت باند در ساعت پنج بعد از ظهر با ظرفیت روی کمان $\langle (A',5), (A'',6) \rangle$ مدل‌بندی شده است.

اگر ظرفیت باند کافی نباشد هواپیما در ناحیه‌ی انتظار می‌ماند و تلاش می‌کند در دوره‌ی زمانی آتی فرود آید. این تأخیر هوایی با برقراری جریان روی کمان $\langle (A',5), (A',6) \rangle$ مشخص می‌شود. و در نهایت برای این که تضمین شود که هواپیما سرانجام به مقصدش می‌رسد، نیاز است جریان به مقصد نهایی فرودگاه برسد که این مقصد نهایی با گره‌ی مربعی نشان داده شده است.



شکل ۱: دیاگرام G-H به‌عنوان مسأله شبکه جریان

البته مسایل واقعی دیگر، می‌تواند در مدل شبکه گنجانده شود که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم:
الف. برای کمان‌های مقصد و کمان‌های مازاد می‌توان هزینه‌های نامنفی در نظر گرفت تا از تأخیر بیش از حد برخی پروازها جلوگیری کرد. این عمل می‌تواند از تأخیر بیش از حد پروازهای ممتد نیز جلوگیری کند. پرواز ممتد به پروازی گفته می‌شود که هواپیمای انجام دهنده‌ی این پرواز ناچار باشد حداقل یک پرواز دیگر نیز انجام دهد، بنابراین تأخیر بیش از حد در پرواز اول، به تأخیر پرواز بعدی منجر می‌شود.

ب. می‌توان کمان‌های پرواز اضافی با ظرفیت نامتناهی و هزینه‌ی ناصفر به شبکه افزود تا افزایش و کاهش سرعت هواپیما نیز در مدل گنجانده شود.

ج. با قرار دادن یک کران ظرفیت بر روی کمان تأخیر متناظر، می‌توان تعداد هواپیماهایی را که در ناحیه‌ی انتظار قرار می‌گیرند، محدود کرد.

البته می‌توان سیاست‌های مدیریتی *NFC* و *FCFS* را تحت مدل *MSDNF* اجرا نمود. در واقع مدل شبکه جریان پویای چند سناریویی تعمیمی از دو مدل فوق است. نخست اینکه، مسأله‌ی تأخیرات زمینی (*GHP*) را می‌توان با یک شبکه‌ی محدود مدل‌بندی کرد که شامل فرودگاه مبدأ، ناحیه‌ی انتظار و فرودگاه مقصد است (شکل ۱ را ببینید). همچنین مدل شبکه‌ی *GHP* تک‌سناریویی، سیاست ابتکاری *FCFS* را مدل‌بندی می‌کند و در نهایت مدل شبکه‌ی *GHP* تک‌سناریویی که تمامی کمان‌های آن ظرفیت نامتناهی دارند، مدل *NFC* را مدل‌بندی می‌کند. در واقع هیچ‌گونه تأخیرات زمینی به پروازها داده نمی‌شود، چرا که یک جواب با هزینه‌ی صفر با اجتناب از پیمودن تمام کمان‌های تأخیر به دست می‌آید.

در ادامه، کارایی نسبی مدل *MSDNF* در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر *NFC* و *FCFS* ارزیابی می‌شود. به‌طور همزمان چندین شرط نظیر بیشترین میزان تراکم، میزان تأخیر ورودی و خروجی و یا برهم‌کنش بین چندین فرودگاه در مدل *MSDNF* می‌تواند بررسی شود. برای درک کارایی نسبی مدل‌ها تنها به بررسی هزینه‌های تأخیر پرداخته می‌شود.

در این‌جا مسایل تحت بررسی بر روی یک شبکه‌ی ساده‌ای از مدل *MSDNF* پیاده‌سازی شده‌اند که هزینه‌های تأخیر را در یک فرودگاه مقصد به حداقل می‌رساند.

۴ داده‌های آزمایشی

برای برآورد دقیق سود خالص در مدل‌های مختلف مدیریتی به داده‌های حقیقی نیاز است. سه نوع داده مورد نیاز می‌باشد: زمان‌های پرواز، پیش‌بینی‌های ظرفیت و هزینه‌ی تأخیرات.

پیچیده‌ترین داده‌ها، زمان‌های پرواز می‌باشند. برای مشخص نمودن تأخیر واقعی هر هواپیما دانستن زمان دقیق پرواز و فرود ضروری است.

از طرفی از آن‌جا که پیش‌بینی دقیق ظرفیت فرودگاه‌های بعدی امکان ندارد، یک توزیع احتمال فرضی می‌سازیم تا قادر باشیم وضعیت‌هایی که ظرفیت فرودگاه در طی چندین ساعت کاهش می‌یابد، مدل‌بندی کنیم. این وضعیت‌ها ممکن است به دلیل وجود مه، بارش باران، بارش برف و یا بادهای شدید به وجود بیاید.

پیش‌بینی می‌شود که ظرفیت تا حد زیادی به زمان وابسته باشد. برای مثال ممکن است مه برای مدتی ملایم باشد، سپس شدید شود و در نهایت قبل از ناپدید شدن ملایم گردد. بنابراین ظرفیت‌های فرودگاه با استفاده از مدل مارکوف سه وضعیتی مدل‌بندی می‌گردد که هر توزیع سه برآمد برای هر دوره‌ی زمانی دارد: ظرفیت کم، ظرفیت متوسط و ظرفیت زیاد.

در این توزیع‌ها امکان دارد یک دوره با ظرفیت متوسط بلافاصله پس از یک دوره زمانی با ظرفیت کم، متوسط و یا زیاد بیاید. به هر حال سناریوها و احتمال‌های متناظر طوری در نظر گرفته شد که مدل اجازه ندهد یک دوره با ظرفیت کم پس از یک دوره با ظرفیت زیاد بیاید و بالعکس.

به طور کلی سناریوها و احتمال‌های متناظر طوری در نظر گرفته شده‌اند که دوره‌های زمانی با ظرفیت‌های مشابه به دنبال هم ظاهر شوند. بدین معنی که یک دوره با ظرفیت متوسط حتی الامکان پس از یک دوره با ظرفیت متوسط بیاید.

از میان ۲۵ فرودگاهی که بیشترین تأخیرات را در سال ۱۹۹۳ داشتند، داده‌های مربوط به پنج فرودگاه با یکدیگر مقایسه شده است. داده‌های مورد نیاز مربوط به این پنج فرودگاه در جدول ۲ آمده است [۱].

ظرفیت		ورودها				
هر بازه ۱۵ دقیقه‌ای		هر بازه ۱۵ دقیقه‌ای				
متوسط	مقادیر	متوسط	ماکزیمم	کل	اولین	تاریخ
۱۳	۸،۱۲،۹	۳/۹۴	۱۹	۱۳۸	۱۹:۰۱	سه‌شنبه <i>ATL</i>
۴	۳،۵،۸	۲/۶۵	۹	۱۵۹	۱۲:۰۲	چهارشنبه <i>DCA</i>
۹	۶،۱۰،۱۴	۳/۷۸	۱۴	۱۵۱	۱۵:۳۴	سه‌شنبه <i>DEN</i>
۶	۶،۸،۴	۱/۶۴	۸	۷۷	۱۶:۱۱	جمعه <i>MCO</i>
۳	۲،۴،۶	۱/۸۰	۶	۸۳	۱۶:۳۱	پنجشنبه <i>SEA</i>

جدول ۲: داده‌های مربوط به پنج فرودگاه در آمریکا

هر دوره‌ی زمانی با یک دوره‌ی ۱۵ دقیقه‌ای متناظر است. لذا در این بررسی به داده‌های ظرفیت، هزینه‌ی تاخیرات و زمان‌های پرواز در هر بازه ۱۵ دقیقه‌ای نیاز است.

سه نوع تاخیرات در این بررسی در نظر گرفته شده است: تاخیرات زمینی، تاخیرات هوایی در ناحیه‌ی انتظار و تاخیرات هوایی مسیری.

تاخیرات هوایی موجود در مسیر در مکان‌هایی در نظر گرفته شد که ۳۰ دقیقه با ناحیه‌ی انتظار فاصله دارند و همان‌طور که قبلاً عنوان شد، هواپیما در این ناحیه سرعت خود را چنان تنظیم می‌کند تا مجبور نباشد قبل از فرود مدت زمان طولانی در صف ناحیه‌ی انتظار بماند.

و بالاخره این که هزینه‌ی تاخیرات زمینی ۲۰/۳۵ و هزینه‌ی تاخیرات هوایی ۴۵/۸۵ در دقیقه برآورد شد. در این بررسی، هزینه‌ی تاخیرات هوایی در ناحیه‌ی انتظار و هزینه‌ی تاخیرات مسیری یکسان در نظر گرفته شد. البته برای کارایی بیشتر می‌توان هزینه‌ی تاخیرات هوایی در ناحیه‌ی انتظار را افزایش داد و یا اینکه کران بالایی روی تعداد هواپیماهایی که در ناحیه‌ی انتظار قرار می‌گیرند، در نظر گرفت.

لازم به ذکر است که پنج فرودگاهی که تحت بررسی بوده‌اند، به گونه‌ای انتخاب شدند تا حتی الامکان تمام وضعیت‌های ممکن را در بر داشته باشند. برای مثال *ATL*، *DEN* و *MCO* فرودگاه‌های مرکزی‌اند و *SEA*

و DCA فرودگاه‌های نیمه مرکزی. همچنین DCA فرودگاهی است که بیشتر پروازهای کوتاه مدت در آن انجام می‌شود و SEA پروازهای بلند مدت و سایر فرودگاه‌ها ترکیبی از هر دو نوع پرواز را شامل می‌شوند. همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد آزمایش در بعد از ظهر و عصر انجام شد تا اندازه‌ی مسأله نسبتاً کوچک باشد. همچنین آزمایش در اواسط هفته (MCO, DEN, ATL) و روزهای پایانی هفته (DCA, SEA) انجام شده است. از آن‌جا که در تعطیلات آخر هفته (شنبه‌ها و یکشنبه‌ها) پروازهای کمتری صورت می‌گیرد، هیچ‌گونه آزمایشی صورت نگرفت [۱].

۵ تجزیه و تحلیل تجربی مدل

دو بخش برای تجزیه و تحلیل وجود دارد: تولید جواب و شبیه‌سازی. در مرحله‌ی تولید جواب از داده‌های مربوط به پنج فرودگاه به‌عنوان ورودی‌های سه مدل مدیریتی ذکر شده استفاده شد. در مدل‌های قطعی ($NFC, FCFS$) متوسط مقادیر ظرفیت به‌کار برده شد و در مدل تصادفی $MSDNF$ از چندین نمونه‌ی فرضی مقادیر ظرفیت استفاده شد. پس از این که جواب‌ها از مدل‌های مختلف به دست آمده‌اند از شبیه‌سازی آماری برای برآورد دقت واقعی جواب‌ها استفاده گردید. به‌کارگیری شبیه‌سازی بدین علت بود که مدل‌های مختلف مدیریتی یک جواب بهینه برای فرم ساده شده‌ای از مسأله پیدا می‌کند که ممکن است یک جواب با کمترین هزینه برای مسأله‌ی اصلی نباشد.

در هر مرحله از شبیه‌سازی یک سناریوی ظرفیت فرضی تولید می‌گردید، سپس آن سناریویی در مدل که بیشترین مطابقت را با سناریوی شبیه‌سازی شده داشت، به‌دست می‌آورد. این تطابق بر اساس دوره‌های زمانی اولیه بنا شده است. در واقع بهترین تطابق، آن سناریویی است که با سناریوی شبیه‌سازی شده در دوره‌های زمانی اولیه‌ی بیشتری مشترک باشد. حال از این سناریوی جدید تولید شده برای تخمین تعداد هواپیماهایی که در هر دوره‌ی زمانی به ناحیه‌ی انتظار می‌رسند، استفاده گردید. سپس با توجه به آن در مورد میزان تأخیر هوایی، میزان تأخیر زمینی و میزان تأخیر هوایی مسیری اختصاص داده شده به هر پرواز تصمیم‌گیری گردید. نتایج این آزمایش در جدول ۳ آمده است [۱].

البته سه نوع مدل $MSDNF$ با تعداد سناریوهای متفاوت در این آزمایش بررسی شد که عبارتند از:

الف. $SDNF-150$: شبکه جریان پویای ۱۵۰ سناریویی

ب. $SDNF-100$: شبکه جریان پویای ۱۰۰ سناریویی

ج. $SDNF-50$: شبکه جریان پویای ۵۰ سناریویی

همچنین آخرین ستون در جدول ۳ یک بازه‌ی اطمینان ۹۵ درصدی از میانگین جامعه را نشان می‌دهد که از قضیه‌ی حد مرکزی به دست آمد. حال به تشریح نتایج به‌دست آمده از جدول ۳ می‌پردازیم:

الف. فرودگاه ATL:

برای این فرودگاه مدل *MSDNF* در مقایسه با *NFC* و *FCFS* به طور قابل توجهی در هزینه صرفه‌جویی می‌کند. افزون بر این کاهش بزرگی در انحراف استاندارد ایجاد می‌کند. برای این فرودگاه مرکزی که پروازهای زیادی در آن انجام می‌شود، مدل *MSDNF* کمترین هزینه‌ی متوسط را دارد.

ب. فرودگاه DCA:

برخلاف انتظار، برای این فرودگاه مدل *NFC* هزینه‌ی کمتری نسبت به هر دو مدل *MSDNF* و *FCFS* دارد. به‌رحال تفاوت آن‌قدر زیاد نیست چرا که *NFC* تقریباً ۲ درصد نسبت به *MSDNF* بهتر عمل می‌کند. و همچنین *MSDNF* انحراف استاندارد پایین‌تری دارد.

البته باید این مطلب را مدنظر داشته باشیم که *NFC* هیچ‌گونه تاخیرات زمینی در نظر نمی‌گیرد، در حالی که *MSDNF* به‌طور قابل توجهی تاخیرات زمینی به پروازها اختصاص می‌دهد.

ج. فرودگاه DEN:

استفاده از مدل *MSDNF* از نوع *SDNF*-۱۵۰ بهترین کارایی را در این فرودگاه داشت. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد متوسط هزینه متناظر با مدل *SDNF*-۵۰ و *FCFS* به ترتیب ۳۰۴۹۷ و ۳۰۴۲۲ دلار می‌باشد که تفاوت چندانی با هم ندارد و موید این مطلب است که افزایش تعداد سناریوها بر کارایی مدل می‌افزاید. در عین حال انحراف استاندارد تمامی مدل‌های *MSDNF* از انحراف استاندارد مدل‌های *NFC* و *FCFS* پایین‌تر می‌باشد.

د. فرودگاه MCO:

نتایج مربوط به این فرودگاه کاملاً انتظارات را برآورده کرد به‌طوری‌که استفاده از مدل *NFC* دارای بیشترین هزینه‌ی متوسط و استفاده از مدل *MSDNF* دارای کمترین هزینه‌ی متوسط بود. حتی مدل *SDNF*-۵۰ نسبت به هر دو مدل *NFC* و *FCFS* کاراتر بود.

ه. فرودگاه SEA:

انتظار می‌رفت در این فرودگاه که بیشتر پروازهای کوتاه مدت انجام می‌شود مدل *MSDNF* کاراتر از *NFC* باشد که نتایج این مطلب را تأیید می‌کند. با این که *SEA* یک فرودگاه مرکزی نیست، هزینه‌ی تأخیرات نسبتاً زیاد می‌باشد.

۶ نتیجه‌گیری

در کل کارایی متوسط مدل‌های چند سناریویی از دیگر مدل‌ها بهتر بود. علاوه بر این افزایش تعداد سناریوها در مدل *MSDNF* هم هزینه‌ی متوسط را پایین آورد و هم واریانس را کاهش داد.

هزینه بر حسب دلار						
فرودگاه	مدل	مینیم	ماکزیمم	متوسط انحراف استاندارد	بازه اطمینان	
ATL	SDNF	۱۰۰-	۳۹۶۸	۱۱۳۴۳۸	۳۵۰۲۸	۱۹۸۳۰
	SDNF	۵۰-	۵۱۸۹	۱۱۵۷۵۵	۳۵۹۶۹	۲۰۶۶۰
	FCFS		۹۱۵۸	۱۳۹۸۳۱	۴۳۹۳۸	۲۸۵۶۷
	NFC		۰	۱۵۱۳۰۵	۵۱۸۹۱	۳۱۴۷۵
DCA	SDNF	۱۵۰-	۳۷۴۰	۶۳۳۵۳۱	۱۸۵۸۴۶	۱۳۹۳۱
	SDNF	۱۰۰-	۳۷۴۰	۶۴۳۶۲۷	۱۸۱۱۸۲	۱۱۷۸۱۴
	SDNF	۵۰-	۲۷۴۸	۶۵۰۸۹۴	۱۸۷۶۶۵	۱۲۶۰۲۷
	FCFS		۲۴۷۲۵	۶۴۰۹۴۹	۱۹۴۰۸۱	۱۳۴۶۱۵
	FCFS		۶۸۸	۶۷۱۹۳۲	۱۸۳۳۷۰	۱۳۸۱۵۶
	NFC					
DEN	SDNF	۱۵۰-	۶۱۱	۱۲۶۸۴۰	۲۹۵۵۵	۲۰۳۸۳
	SDNF	۱۰۰-	۶۱۱	۱۲۷۲۲۳	۲۹۹۳۸	۲۰۸۴۶
	SDNF	۵۰-	۱۵۲۶	۱۳۱۰۴۸	۳۰۴۹۷	۲۱۷۶۶
	FCFS		۶۱۰۵	۱۲۹۹۰۰	۳۰۴۲۲	۲۲۹۹۳
	NFC		۰	۱۳۷۵۵۰	۳۲۴۵۴	۲۵۳۰۴
MCO	SDNF	۱۵۰-	۳۰۵	۱۴۷۴۸	۴۷۲۱	۳۶۹۰
	SDNF	۱۰۰-	۳۰۵	۱۴۷۴۸	۴۸۴۰	۳۷۴۳
	SDNF	۵۰-	۰	۱۵۱۳۱	۴۸۳۲	۳۹۷۴
	FCFS		۱۲۲۱	۱۳۶۰۱	۵۰۲۹	۴۴۲۹
	NFC		۰	۱۵۱۳۱	۵۸۷۴	۵۰۸۱
SEA	SDNF	۱۵۰-	۳۶۶۳	۴۶۳۲۹۳	۱۵۶۹۹۵	۸۴۱۹۳
	SDNF	۱۰۰-	۳۳۵۸	۴۵۷۴۰۹	۱۶۰۹۹۵	۸۴۷۷۰
	SDNF	۵۰-	۱۸۳۲	۴۵۱۰۰۶	۱۶۴۱۲۲	۸۷۰۵۳
	FCFS		۳۹۹۸۸	۴۰۶۵۵۹	۱۷۶۵۴۱	۹۹۸۴۳
	NFC		۶۸۰۸۷	۴۵۶۶۶۶	۲۱۸۲۵۹	۱۰۳۸۱۷۹

جدول ۳: هزینه‌های تاخیر شبیه‌سازی شده متناظر با فرودگاه‌های مختلف

سود نسبی مدل MSDNF نسبت به دیگر مدل‌ها در جدول ۴ آمده است [۱]. این نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه جریان پویای چند سناریویی ۹/۱ درصد هزینه‌ی تأخیرات ترافیک هوایی را نسبت به سیاست جاری اولین ورود-اولین سرویس بهبود می‌بخشد.

سود نسبی مدل <i>MSDNF</i> نسبت به سایر مدل‌ها				
بر حسب درصد		بر حسب دلار		مسأله
<i>NFC</i>	<i>FCFS</i>	<i>NFC</i>	<i>FCFS</i>	
۳۲/۵	۲۰/۳	۱۶۸۶۳	۸۹۱۰	<i>ATL</i>
-۱/۳	۴/۲	-۲۴۷۶	۸۲۳۵	<i>DCA</i>
۷/۸	۲/۴	۱۰۷۱۰	۳۰۶۰	<i>DEN</i>
۱۹/۶	۷/۴	۱۱۵۳	۳۷۶	<i>MCO</i>
۲۸/۱	۱۱/۱	۶۱۲۶۴	۱۹۴۵۶	<i>SEA</i>
۱۷/۳	۹/۱			میانگین

جدول ۴: سود نسبی مدل چند سناریویی

تشکر و قدردانی

گردآورندگان مقاله از مرکز پژوهشی ابرساختارهای جبری و ریاضیات فازی برای حمایتشان قدردانی می نمایند.

منابع

- [1] G. D. Glockner, (1996), Effects of Air Traffic Congestion Delays Under Several Flow Management Policies, *Transportation Research Record* 1517, 29-36.
- [2] G. D. Glockner, G. L. Nemhauser, and C. A. Tovey, (2001), Dynamic Networks Flow with Uncertain Arc Capacities: Algorithm and Computational Results, *Computational Optimization and Applications* 18, 233-250.
- [3] G. D. Glockner, G. L. Nemhauser, and C. A. Tovey, (2000), Dynamic Networks Flow with Uncertain Arc Capacities: Formulation and Problem Structural, *Operations Research* 48(1), 233-242.
- [4] A. R. Odoni, (1987), The Flow Management problem in Air Traffic Control, in A. R. Odoni, L. Bianco, and G. szego, eds., *Flow Control of Congested Network*, PP. 269-288, Springer-Verlag, Berlin.
- [5] P. B. Vranas, D. J. Bertismas, and A. R. Odoni, (1994), Dynamic Ground-Holding Policies for a Network of Airport, *Transportation Science* 28, 275-291.
- [6] P. B. Vranas, D. J. Bertismas, and A. R. Odoni, (1994), the Multi-Airport Ground-Holding Policies for a Network of Airport, *Operations Research* 42, 249-261.