نشریهٔ تخصصی مهندسی صنایع (ویژه‌نامهٔ یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع)، دورهٔ ۵۰، شمارهٔ ۳، سال ۱۳۹۵، از صفحه ۴۸۳ تا ۴۹۵ ۴۸۳

مدیریت درآمد حمل‌ونقل هوایی بار در شرایط بهره‌برداری متغیر از ظرفیت با درنظرگرفتن امکان رزرو مضاعف

محمد وردی چاری[۱]، علی حسین‌زاده کاشان[۲*]

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت‌مدرس

۲. استادیار دانشکدهٔ مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت‌مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۵/۰۲/۳۱، تاریخ تصویب: ۹۵/۰۳/۰۶)

چکیده

مدیریت درآمد[۱]، شاخه‌ای از علم پژوهش در عملیات است که هدف اصلی آن، حداکثرسازی درآمد حاصل از فروش محصولات و خدمات ازبین‌رفتنی طی یک دورهٔ زمانی معین است. با توجه به رشد زیاد حمل‌ونقل هوایی بار در سال‌های اخیر، در این صنعت نیاز به ارائهٔ تکنیک‌هایی برای بیشینه‌سازی درآمد احساس می‌شود. در این مقاله، مسئلهٔ تخصیص ظرفیت، با فرض امکان‌پذیر بودن یا نبودن رزرو مضاعف بررسی می‌شود. از آنجاکه در این پژوهش، یافتن جواب بهینهٔ الگوریتم برنامه‌ریزی پویا نیازمند حافظهٔ زیاد است، سه روش حل ابتکاری شامل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی[۲]، قیمت پیشنهادی[۳] و تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا[۴] برای حل مسئله ارائه می‌شود. نتایج، بیانگر عملکرد بهتر BP و DILP در مقایسه با روش‌های دیگر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد درنظرگرفتن امکان رزرو مضاعف سبب افزایش بیش از ۱۰ درصدی در درآمد کل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل هوایی بار، رزرو مضاعف، لغو درخواست، مدیریت

مقدمه

مدیریت درآمد (RM)، هنر بیشینه‌سازی درآمد شرکت، به‌وسیلهٔ پیش‌بینی رفتار مشتری و تقاضا برای محصولات یا خدمات ازبین‌رفتنی است [۱]. هدف اولیهٔ مدیریت درآمد، فروش محصول مناسب به مشتری مناسب با قیمت مناسب و در زمان مناسب است. برای دستیابی به این هدف، دانش جامع و کاملی از بازار به‌منظور درک رفتار مشتریان و ارزش محصول مورد نیاز است. از زمان وقوع انقلاب در صنعت هواپیمایی در دههٔ ۱۹۷۰ و با افزایش حاملان دارای هزینهٔ پایین، شرکت‌های هواپیمایی بزرگ، تکنیک‌های پیچیدهٔ RM را ارائه کردند. پس از پیاده‌سازی موفق RM در صنعت هواپیمایی، صنایع دیگری مانند هتلداری و اجارهٔ اتومبیل نیز به‌سرعت از این تکنیک بهره گرفتند. تمامی صنایعی که دارای ظرفیت ثابت و ازدست‌رفتنی و نیز دارای تقاضای متغیر باشند، قادرند با به‌کارگیری مناسب RM سود خود را افزایش دهند. با اینکه صنعت حمل‌ونقل هوایی بار، دارای مشخصه‌های سازگار با RM است، به مقولهٔ مدیریت درآمد در حوزهٔ حمل‌ونقل بار به‌ندرت پرداخته شده است. دلیل اصلی این امر، پیچیده‌تربودن صنعت حمل بار در مقایسه با حمل‌ونقل مسافران است. محصولات فروخته‌شده برای حمل هوایی دارای ابعاد چندگانه (حجم و وزن)، محدودیت در اندازه، نیازمند مراقبت‌های ویژه (محصولات سرد)، محدودیت در کنار یکدیگر قرارگرفتن و بسیاری موارد دیگر هستند که تصمیم‌گیری‌های مربوط به آن‌ها را دشوار می‌سازد.

امروزه با توجه به رشد تجارت جهانی و ضرورت تحویل سریع سفارش‌ها، نیاز به حمل‌ونقل هوایی بار بیش‌ازپیش احساس می‌شود؛ به‌طوری‌که طی سال‌های اخیر، رشد سالیانهٔ حدود ۶ تا ۷ درصدی برای این صنعت گزارش شده است [۲]. با وجود شباهت زیاد بین مدیریت درآمد حمل‌ونقل مسافران و مدیریت درآمد حمل‌ونقل هوایی بار، تفاوت‌هایی نیز بین این دو وجود دارد؛ برای مثال، محموله‌های هوایی نیازمند ظرفیت چندبعدی (حجم و وزن) هستند؛ درحالی‌که مسافران هواپیما، تنها به یک بعد ظرفیت (صندلی) نیاز دارند. تفاوت دیگر این دو حوزه، ماهیت تصادفی میزان ظرفیت مورد نیاز برای

* نویسندهٔ مسئول تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۹۸ فکس: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۹۳ Email: a.kashan@modares.ac.ir

درخواست‌های واردشده است؛ برای مثال، محموله‌ها دارای حجم و وزن متغیری هستند و درنتیجه، میزان ظرفیت مورد نیاز نیز متغیر خواهد بود. این در حالی است که میزان ظرفیت مورد نیاز برای مسافران ثابت است (هر نفر یک صندلی را اشغال می‌کند). پژوهش‌های اولیه در حوزهٔ مدیریت درآمد حمل‌ونقل بار، عمدتاً گزارش‌های کیفی بیانگر پیاده‌سازی موفق به‌وسیلهٔ شرکت‌های هواپیمایی است [۳، ۴ و ۵]. حتی پژوهش‌هایی که به‌تازگی در زمینهٔ مدل‌های کمی انجام شده نیز چندان غنی نیستند. اولین مدل تک‌پرواز در [۶] ارائه شد. در این پژوهش، مدل ایستایی - که بسیار شبیه به برنامه‌ریزی خطی قطعی است و برای تعیین قیمت‌های آستانه‌ای در مدیریت درآمد شبکه استفاده می‌شود - بررسی شد. ارائهٔ اولین مدل کنترل ظرفیت شبکه در حوزهٔ حمل‌ونقل بار به‌وسیلهٔ [۷] انجام گرفت. در این تحقیق، نویسندگان درخواست‌ها را برحسب وزن، حجم، درآمد و نوع پرواز دسته‌بندی کردند. سپس مسئله به‌عنوان یک مسئلهٔ کوله‌پشتی آنلاین چندبعدی ایستا، مدل‌سازی و به‌وسیلهٔ الگوریتم حریصانه حل شد. مطالعات شبیه‌سازی، حکایت از عملکرد بهتر سیاست قیمت پیشنهادی آن‌ها در مقایسه با سیاست قیمت پیشنهادی حاصل از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی دارد. در [۸] اولین مدل برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئلهٔ کنترل ظرفیت تک‌بخش پرواز ارائه شد. در [۹] روش برنامه‌ریزی احتمالی ایستا برای مدل‌سازی مسئلهٔ تخصیص ظرفیت با بخش‌های پروازی چندگانه بررسی شد. در [۱۰] مسئلهٔ کنترل ظرفیت بازار فروش نقدی برای پروازهای چندبخشی مدل‌سازی شد. ایدهٔ منحصربه‌فرد در این تحقیق، تجزیهٔ مسئله به دو زیرمسئلهٔ کنترل ظرفیت محموله‌های بزرگ و کوچک است که هردو آن‌ها، تنها بعد وزنی را درنظر می‌گیرند. در [۱۱] محققان یک مدل کنترل ظرفیت پویای تک‌بخشی را ارائه کردند که در آن، از تعداد محموله‌های پذیرش‌شدهٔ هریک از کلاس‌ها به‌عنوان متغیر حالت استفاده می‌شود. در [۱۲] روشی ابتکاری ارائه شد که هم‌زمان درآمد مورد انتظار از وزن و حجم را تخمین می‌زند. برای کاهش بار محاسباتی، تعداد محدودی از نقاط نمونه در فضای حالت ارزیابی شدند؛ بنابراین، نویسندگان از تخمین‌های اشتباه حاصل از تجزیهٔ وزن و حجم اجتناب کردند. تنها در تعداد اندکی از سناریوها، این روش ابتکاری، بهتر از روش تجزیهٔ حجم و وزن ارائه‌شده در [۱۱] عمل می‌کند. در [۱۳] نویسندگان مدلی جامع را با درنظرگرفتن احتیاجات تصادفی به منبع ارائه کردند که اگر تنها یک منبع درنظر گرفته شود، قادر به استفاده در حوزهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل بار خواهد بود. در [۱۴] فرایند رزرواسیون به‌صورت یک زنجیرهٔ مارکوف مدل شد؛ به‌طوری‌که تعداد سناریوهای ممکن برای فروش حجم و وزن را کاهش دهد. سپس قیمت‌های پیشنهادی حداکثرکنندهٔ درآمد به‌وسیلهٔ برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب به‌دست آمد. نویسندگان نشان دادند که روش آن‌ها نسبت به سیاست قیمت پیشنهادی ایستا - که در [۷] ارائه شده است – دارای عملکرد بهتری است. در [۱۵] نیز یک مدل کنترل ظرفیت پویای شبکه ارائه شد که در آن، قطعی‌نبودن ظرفیت در دست لحاظ شد.

از جمله پژوهش‌های موجود در زمینهٔ مدیریت درآمد شبکه در حوزهٔ حمل‌ونقل بار می‌توان به [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] اشاره کرد. در [۱۶] یک مدل برنامه‌ریزی پویای شبکه‌ای با لحاظ‌کردن عدم قطعیت در زمان ورود درخواست برای رزرواسیون و میزان حجم و وزن مورد نیاز ارائه شد. در این تحقیق، از روش برنامه‌ریزی خطی و محاسبهٔ مبتنی‌بر شبیه‌سازی احتمالی برای حل مسئله استفاده شد. به‌طور مشابه در [۱۷] یک حد بالا برای مسئلهٔ مدیریت درآمد شبکه براساس مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه شد و رویکردی به‌منظور تعیین قیمت پیشنهادی برای هردو بعد ظرفیت (حجم و وزن) در هر بخش مسیر پرواز معرفی شد.

در [۱۸] مسئلهٔ مدیریت درآمد شبکه در حوزهٔ حمل‌ونقل بار بررسی شد. در این تحقیق، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی پویای چندبعدی برای مسئله ارائه شد. سپس به‌علت پیچیدگی مدل برنامه‌ریزی پویا، دو مدل مبتنی‌بر برنامه‌ریزی خطی به‌منظور حل مسئله معرفی شد. به‌منظور افزایش دقت مدل برنامه‌ریزی خطی، در محاسبهٔ هزینهٔ فرصت منابع، از مفهوم فاکتور تعدیل پویا استفاده شده است. در این تحقیق، بررسی رزرو مضاعف انجام نگرفت.

در [۱۹] مسئلهٔ مدیریت درآمد شبکه در حوزهٔ حمل‌ونقل بار در شرایط عدم قطعیت در ظرفیت در دست،

بررسی شد. همچنین در این تحقیق، ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی محدودیت‌دار برای مسئله صورت گرفت.

در [۲۰]، محققان یک مدل رزرو مضاعف برای مسئلهٔ مدیریت درآمد حمل‌ونقل بار ارائه کردند. ارائهٔ مدل ریاضی به‌منظور یافتن مقدار بهینهٔ رزرو مضاعف با هدف حداقل‌سازی هزینهٔ کل، شامل هزینهٔ تخلیهٔ درخواست مازاد و هزینهٔ ازدست‌رفتهٔ ظرفیت بلااستفاده صورت پذیرفت. با توجه به پیچیدگی مربوط به یافتن مقدار بهینهٔ رزرو مضاعف، در این پژوهش، مدل رگرسیونی به‌منظور تخمین مقدار رزرو مضاعف به‌کار رفت. نتایج بیانگر دقت ۹۸/۳ درصدی روش پیشنهادی است.

در این تحقیق، مسئلهٔ کنترل ظرفیت در حوزهٔ حمل‌ونقل هوایی بار، با هدف حداکثرسازی درآمد در شرایط بهره‌برداری متغیر از ظرفیت، در دو حالت امکان لغو درخواست و عدم امکان لغو درخواست بررسی می‌شود. اغلب برای مدل‌سازی مسائل حوزهٔ مدیریت درآمد، از برنامه‌ریزی پویا استفاده می‌شود که خود حالت خاصی از فرایند مارکوف است. از آنجاکه حل دقیق مسئله با مدل برنامه‌ریزی پویا، به‌علت فضای حالت بسیار بزرگ عملی نیست، می‌توان از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای به‌دست‌آوردن جواب‌های مطلوب استفاده کرد. در همین راستا، در این تحقیق روش‌های حل ابتکاری مناسبی برای مسئله ارائه می‌شود و ارزیابی عملکرد هریک از آن‌ها به‌کیفیت جواب و زمان حل صورت می‌گیرد. در کنار موارد فوق، هدف دیگر این پژوهش، تحلیل و بررسی رویکرد رزرو مضاعف در میزان درآمد کل مورد انتظار است.

آنچه این تحقیق را از پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند، به شرح زیر است:

۱. در این تحقیق، مسئلهٔ کنترل ظرفیت در حوزهٔ حمل‌ونقل هوایی بار با وجود محدودیت ظرفیت دوبعدی (وزن و حجم) و امکان نیازمندی متغیر به ظرفیت حجمی و وزنی به ازای هر درخواست رزرو، بررسی شده است.

۱- در اینجا مدل‌سازی مسئلهٔ مدیریت درآمد در حوزهٔ حمل‌ونقل بار، با درنظرگرفتن امکان رزرو مضاعف مدنظر است و روش‌های مختلفی برای حل آن ارائه می‌شود.

۲- این تحقیق به مقایسهٔ دو حالت امکان رزرو مضاعف و نبود امکان رزرو مضاعف در حوزهٔ حمل‌ونقل بار می‌پردازد و توجیه‌پذیری استفاده از رویکرد رزرو مضاعف را بررسی می‌کند.

۳- در این تحقیق، برای هردو حالت امکان‌پذیر بودن و نبودن رزرو مضاعف، چندین روش حل ابتکاری در مسئله ارائه شده است. تحلیل نتایج حاصل از روش‌های ارائه‌شده و ارزیابی و مقایسهٔ کمی و کیفی جواب‌ها نیز انجام گرفته است.

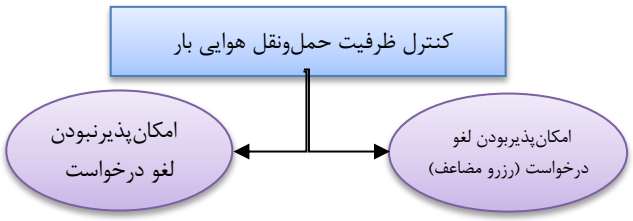
ادامهٔ مقاله به‌صورت زیر است. در بخش بعدی، مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل بار در دو حالت امکان‌پذیر بودن و نبودن لغو درخواست بررسی می‌شود. در ادامه، مدل برنامه‌ریزی پویا و روش‌های حل ابتکاری برای هردو مسئله ارائه می‌شود. پس از آن در بخش بعدی، با انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی، عملکرد روش‌های حل پیشنهادی به‌صورت جداگانه برای دو مسئله ارزیابی می‌شود و با بررسی هم‌زمان آن‌ها، تأثیر نقش لغو درخواست‌ها بر درآمد کل بررسی می‌شود. در انتها نیز نتایج مقاله به‌همراه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

بیان مسئله

در این پژوهش، دو مسئله در زمینهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل هوایی بار تحت شرایط بهره‌برداری متغیر از ظرفیت، شامل امکان‌پذیر بودن و نبودن لغو درخواست بررسی می‌شود (شکل ۱). در هردو مدل، هدف حداکثرسازی درآمد کل مورد انتظار است. در حالت عدم امکان لغو درخواست، درصورت پذیرش یک درخواست فرض می‌شود که این درخواست به‌طور قطع در زمان ارائهٔ خدمت حضور می‌یابد و مسئلهٔ اصلی، تصمیم‌گیری دربارهٔ پذیرش یا عدم پذیرش درخواست‌های ورودی است؛ به‌نحوی‌که مطابق ظرفیت موجود، درآمد کل مورد انتظار حداکثر شود.

در حالتی که امکان لغو درخواست مجاز باشد، ممکن است برخی از درخواست‌های ورودی پذیرش‌شده، خواستار لغو درخواست خود باشند که در این صورت، ظرفیت تخصیص‌یافته به این مشتری یا درخواست آزاد می‌شود و امکان بهره‌برداری مجدد از آن وجود دارد؛ بنابراین، در این

حالت امکان دارد به این نتیجه برسیم که تعداد (مقدار) درخواست‌های پذیرش‌شده باید بیش از مقدار ظرفیت در دست باشد تا درصورت لغو درخواست توسط برخی از مشتریان، امکان استفادهٔ مجدد از فرصت پیش‌آمده وجود داشته باشد. در ادامه، این مسئله به‌طور کامل توضیح داده می‌شود.



شکل ۱. مسائل مورد بررسی در این تحقیق

مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل هوایی بار در شرایط عدم امکان لغو درخواست

در این حالت، امکان هیچ‌گونه لغو درخواستی وجود ندارد و میزان رزرواسیون باید به مقدار ظرفیت انجام شود و در نتیجه امکان رزرو مضاعف وجود ندارد. بخش زیر به توصیف بیشتر مسئلهٔ می‌پردازد.

توصیف مسئله (حالت عدم امکان رزرو مضاعف)

هواپیمایی را با ظرفیت حجمی C_v و ظرفیت وزنی C_w درنظر بگیرید. فرایند ورود درخواست‌ها از یک توزیع پواسون پیروی می‌کند. دورهٔ رزرواسیون (T) باید طوری تعیین شود که در هر دوره امکان ورود حداکثر یک درخواست وجود داشته باشد. فرض می‌شود m نوع کلاس قیمتی تقاضا وجود دارد و احتمال ورود هر درخواست از کلاس قیمتی نوع i در دورهٔ زمانی t برابر با $\gamma_i(t)$ و احتمال واردنشدن درخواست در دورهٔ زمانی t برابر با $\gamma_0(t) = 1 - \sum_{i=1}^{m} \gamma_i(t)$ خواهد بود. اگر درخواستی از کلاس قیمتی نوع i با حجم v_i و وزن w_i وارد شود، تصمیم‌گیرنده باید بلافاصله درمورد پذیرش یا رد درخواست تصمیم‌گیری کند. درصورت پذیرش یک درخواست، درآمدی به اندازهٔ ρ_i به‌دست خواهد آمد و به اندازهٔ v_i و w_i از ظرفیت در دست کاسته می‌شود، اما درصورت رد، ظرفیت باقی‌مانده برای تقاضای مورد انتظار آتی با درآمد بالاتر حفظ می‌شود.

مدل برنامه‌ریزی پویا

مطابق مطالب ذکرشده در بخش قبل، در این مسئله حداکثر به اندازهٔ ظرفیت در دست می‌توان رزرو کرد. به‌طورکلی، برای مدل‌سازی مسائل مربوط به مدیریت درآمد، از برنامه‌ریزی پویا استفاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی پویای مسئلهٔ حمل‌ونقل هوایی بار در شرایط عدم امکان لغو درخواست به شرح زیر است.

فرض کنید (C_w, C_v) نشان‌دهندهٔ بردار ظرفیت حجمی و وزنی حامل بار و t مدت باقی‌مانده تا ارائهٔ خدمت باشد. حال اگر $g(t, C_w, C_v)$ را تابع ارزش و برابر با حداکثر درآمد انتظاری قابل‌دستیابی در دورهٔ زمانی t با حالت فعلی (C_w, C_v) بنامیم، توابع ارزش در دوره‌های زمانی مختلف را می‌توان به‌صورت بازگشتی (رو به عقب) و با کمک روابط بهینگی Bellman به‌صورت زیر محاسبه کرد. طول دورهٔ برنامه‌ریزی برابر با T است (t=1,…,T).

$$g(t, C_w, C_v) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i(t)\, max\{\rho_i + g(t-1, C_w - w_i, C_v - v_i), g(t-1, C_w, C_v)\} + \gamma_0(t).\, g(t-1, C_w, C_v), \quad t = 1, \dots, T \qquad (۱)$$

$$\rho_i = r_i.max\{w_i, \frac{v_i}{\lambda}\} \qquad (۲)$$

r_i درآمد هر واحد وزنی، λ نرخ چگالی استاندارد برای بار و ρ_i بیانگر درآمد حاصل از پذیرش درخواست بار مربوط به کلاس قیمتی نوع i است. شرایط حدی برای مدل فوق به‌صورت زیر است:

$$g(t, C_w, 0) = 0 \quad g(0, C_w, C_v) = 0, \quad g(t, 0, C_v) = 0,$$

به‌ترتیب از چپ به راست، عبارت اول بیان می‌کند که درصورت وجود ظرفیت حجمی و وزنی در زمان ارائهٔ خدمت، این ظرفیت هیچ ارزشی تولید نخواهد کرد و بدون استفاده خواهد ماند. رابطه‌های دوم و سوم نیز نشان می‌دهند که با اتمام یک بعد از ظرفیت، دیگر نمی‌توان ارزشی به‌دست آورد.

در رابطهٔ ۱ درصورت وجود درخواست ورودی، همواره دو رویکرد پذیرش و عدم پذیرش وجود دارد. درصورت پذیرش یک درخواست، درآمدی به اندازهٔ ρ_i به‌دست می‌آید و ظرفیت در دست به مقدار $(C_w - w_i, C_v - v_i)$ کاهش پیدا می‌کند و درصورت عدم پذیرش درخواست نیز ظرفیت برای دورهٔ بعد باقی می‌ماند.

سیاست بهینه برای پذیرش درخواست رزرواسیون در دورهٔ t وقتی‌که حالت سیستم C_w و C_v است، برابر است با:

$$\rho_i \geq g(t-1, C_w, C_v) - g(t-1, C_w - w_i, C_v - v_i) \quad (۳)$$

سمت راست عبارت ۳ نشانگر هزینهٔ فرصت ناشی از عدم پذیرش یک درخواست است و سمت چپ نیز درآمد حاصل از پذیرش یک درخواست بار از کلاس قیمتی نوع i را بیان می‌کند؛ بنابراین، براساس نامساوی ۳، سیاست بهینه برای پذیرش یک درخواست از کلاس قیمتی نوع i بزرگ‌تر یا مساوی‌بودن درآمد حاصل از آن نسبت به هزینهٔ فرصت ناشی از رد آن است.

برخلاف ماهیت سادهٔ عبارت ۳، فرایند تصمیم‌گیری مارکوفی و بالطبع مدل برنامه‌ریزی پویا دارای پیچیدگی ناشی از افزایش بعد است، زیرا در این مسئله باید تمامی مقادیر ارزش و به عبارت بهتر ارزش $g(t, C_w, C_v)$ برای هر حالت (t, C_w, C_v) ذخیره شود. به غیر از مواردی خاص، هیچ مشخصهٔ ساختاری خاصی که نیازهای محاسباتی و ذخیرهٔ داده ها را در سطح کاربردی کاهش دهد، برای سیاست پذیرش بهینه وجود ندارد. با این پیش‌زمینه، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا، به‌منظور یافتن حل بهینه برای مسائل واقعی شدنی نیست و درنتیجه، برای یافتن جواب‌های مطلوب و نه لزوماً بهینهٔ، باید از تکنیک های حل ابتکاری یا فراابتکاری استفاده کرد. در ادامه، چند روش ابتکاری برای مسئلهٔ مورد نظر ارائه می‌شود.

➢ روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی (DILP)

منظور از عبارت قطعی در این روش، جایگزینی پارامترهای غیرقطعی مسئله شامل تقاضا و میزان ظرفیت مورد نیاز هر درخواست، با مقدار مورد انتظارشان است. در این مدل، $\overline{D}_{it}$، $\overline{w}_i$ و $\overline{v}_i$ به‌ترتیب بیانگر مجموع تقاضای مورد انتظار تا زمان t و بردار ضرایب استفاده از ظرفیت وزنی و حجمی هستند. متغیر x_i نشانگر تعداد درخواست‌های پذیرفته‌شده از کلاس قیمتی نوع i است.

$$max \sum_{i=1}^{m} \rho_i x_i \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \bar{v}_i x_i \leq C_v \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \overline{w}_i x_i \leq C_w \quad (۶)$$

$$\rho_i \geq r_i . \overline{w}_i \quad (۷)$$

$$\rho_i \geq r_i . \bar{v}_i / \lambda \quad (۸)$$

$$x_i \leq \overline{D}_i \quad (۹)$$

$$x_i \geq 0, integer \quad (۱۰)$$

رابطهٔ ۴، درآمد کل مورد انتظار را - که شامل درآمد حاصل از پذیرش یک درخواست است - حداکثر می‌کند. محدودیت های ۵ و ۶ به این موضوع اشاره می‌کنند که میزان کل ظرفیت مورد استفاده به‌وسیلهٔ محصولات پذیرش‌شده باید کمتر از ظرفیت حجمی و وزنی در دست باشد. محدودیت های ۷ و ۸ محدودیت های مربوط به درآمد حاصل از وزن قابل‌مطالبه هستند. محدودیت ۹ بیان می کند که تعداد درخواست‌های پذیرفته‌شده از کلاس قیمتی نوع i حداکثر برابر با تقاضای مورد انتظار برای آن کلاس قیمتی است. درنهایت نیز محدودیت ۱۰ نشان‌دهندهٔ نامنفی و عدد صحیح‌بودن متغیر مسئله (تعداد سفارش‌های پذیرفته‌شده) است.

➢ روش تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا (DPD)

در روش تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا، مدل برنامه‌ریزی پویای مسئله، برحسب وزن و حجم به دو زیرمدل تبدیل می‌شود و در انتها با جمع درآمد مورد انتظار دو مدل، درآمد کل به‌دست می‌آید. در این روش باید به این موضوع اشاره کرد که درآمد هر واحد ظرفیت از هر کلاس قیمتی، نصف درآمد واقعی بیان‌شده در مسئلهٔ اصلی فرض می‌شود

(اهمیت ظرفیت حجمی و وزنی یکسان در نظر گرفته شده است). مدل تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا، برحسب وزن و حجم به‌صورت زیر است (t=1,…T):

$$\acute{r}_i = \frac{r_i}{2} \quad (۱۱)$$

$$\acute{\rho}_i = \acute{r}_i . max\{w_i, \frac{v_i}{\lambda}\} \quad (۱۲)$$

$$g1(t, C_w) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i(t) . max\{\acute{\rho}_i + g(t-1, C_w - w_i), g(t-1, C_w)\} + \gamma_0(t) . g(t-1, C_w) \quad (۱۳)$$

$$g2(t, C_v) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i(t) . max\{\acute{\rho}_i + g(t-1, C_v - v_i), g(t-1, C_v)\} + \gamma_0(t) . g(t-1, C_v) \quad (۱۴)$$

$$gtotal(t) = g1(t, C_w) + g2(t, C_v) \quad (۱۵)$$

➢ **روش قیمت پیشنهادی (BP)**

روش قیمت پیشنهادی، آخرین روش ابتکاری ارائه‌شده برای مسئله است. BP حداقل درآمد مورد نیاز برای پذیرش یک درخواست رزرواسیون را نشان می‌دهد؛ به‌عبارت دیگر، یک درخواست پذیرش می‌شود اگر و تنها اگر درآمد حاصل از آن فراتر از BP باشد. BP درحقیقت به‌نوعی بیانگر ارزش هر واحد منبع است؛ یعنی با کاهش مقدار ظرفیت (منبع)، BP افزایش می‌یابد، اما این موضوع همواره صادق نیست و در برخی از صنایع، خلاف آن حکم‌فرماست. به‌منظور محاسبهٔ دقیق BP باید مقدار آن در هر لحظه به‌روز شود، اما از آنجاکه این کار بسیار زمان‌بر و غیرممکن است، سعی می‌شود به‌روزرسانی در دوره‌های زمانی ازپیش تعیین‌شده صورت گیرد. تعیین دوره‌های زمانی به‌روزرسانی باید به‌نحوی باشد که هرچه به انتهای دورهٔ رزرواسیون نزدیک‌تر می‌شویم، تعداد دفعات به‌روزرسانی افزایش یابد، زیرا با محدودشدن ظرفیت، تصمیم‌گیری برای پذیرش درخواست ها حساس‌تر خواهد شد. یکی از روش‌های متداول برای تعیین قیمت پیشنهادی، استفاده از مقادیر دوگان (قیمت سایه) محدودیت‌های ظرفیت مدل برنامه‌ریزی خطی مسئله است. در این تحقیق، BP براساس مقادیر دوگان مربوط به محدودیت‌های ظرفیت مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی محاسبه می‌شود و درواقع، ارزش هر واحد از منبع حجمی و وزنی را با (d_w, d_v) نشان می‌دهد. در این روش، شرط پذیرش یک درخواست نوع i به‌صورت زیر است:

$$v_i \le C_v \quad (۱۶)$$

$$w_i \le C_w \quad (۱۷)$$

$$\rho_i \ge v_i d_v + w_i d_w \quad (۱۸)$$

$$\rho_i = r_i \left(max\left\{w_i, \frac{v_i}{\lambda}\right\}\right) \quad (۱۹)$$

$$Rtotal = \sum_{i=1}^{m} \rho_i x_i \quad (۲۰)$$

در رابطهٔ فوق C_v و C_w بیانگر ظرفیت باقی‌مانده است. عبارت‌های ۱۶ تا ۱۹ به این موضوع اشاره می‌کنند که شرط لازم برای پذیرش یک درخواست رزرواسیون با حجم و وزن (w_i, v_i)، در وهلهٔ اول، وجود ظرفیت حجمی و وزنی کافی و در وهلهٔ دوم، بیشتربودن درآمد آن درخواست از قیمت آستانه‌ای است. رابطهٔ ۲۰ نیز درآمد کل حاصل از درخواست‌های پذیرش‌شده را نشان می‌دهد.

کنترل ظرفیت حمل‌ونقل هوایی بار در شرایط امکان لغو درخواست

در این حالت، برخلاف حالت قبلی، لغو درخواست برای درخواست‌های پذیرش‌شده امکان‌پذیر است. این امر سبب می‌شود تا درصورت استفاده از سیاست پذیرش برحسب مدل قبلی، به‌دلیل امکان لغو درخواست برخی از درخواست‌های پذیرفته‌شده، بخشی از ظرفیت بدون استفاده بماند که این موضوع سبب ازدست‌رفتن یک سود بالقوه خواهد شد. در همین راستا، در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی پویا با لحاظ‌کردن این شرط ارائه می‌شود. نیاز به حافظهٔ زیاد مدل برنامه‌ریزی پویا برای حل مسائل بزرگ، استفاده از روش‌های حل ابتکاری را به یک ضرورت برای این نوع مسائل تبدیل کرده است. روش‌های حل ابتکاری ارائه‌شده در این بخش، حالت توسعه‌یافته‌تر مدل‌های بخش قبل هستند.

بیان مسئله (حالت امکان لغو درخواست)

در مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل بار با امکان لغو درخواست، به‌علت احتمال لغو برخی از درخواست‌های پذیرفته‌شده، تصمیم‌گیری درمورد تعداد (میزان ظرفیت) مورد پذیرش باید به بیشترین درآمد کل مورد انتظار بینجامد. در اینجا باید به دو نوع ریسک توجه کرد. ریسک اول مربوط به زمانی است که تعداد درخواست‌های

(ظرفیت) حاضر برای دریافت خدمت (مواردی که درخواست خود را لغو نکرده‌اند)، کمتر از ظرفیت در دست باشد که این امر سبب ازدست‌رفتن بخشی از سود خواهد شد که می‌توانستیم با پذیرش درخواست‌های بیشتر کسب کنیم. ریسک دوم مربوط به زمانی است که تعداد درخواست‌های حاضر برای دریافت خدمت، بیشتر از ظرفیت در دست باشد و درواقع، قادر به ارائهٔ خدمات به بخشی از درخواست‌ها نباشیم. این امر سبب پرداخت جریمه‌ای بیش از قیمت بار (در خوش‌بینانه‌ترین حالت) به درخواست‌های سرویس‌داده‌نشده می‌شود و درنتیجه، سود و درآمد کل مورد انتظار کاهش می‌یابد؛ بنابراین، تعیین حدود ظرفیتی که پذیرش می‌شود، باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که حداقل ریسک را داشته باشد. در ادامهٔ این بخش، مدل برنامه‌ریزی پویا و روش‌های حل ابتکاری برای این مسئله ارائه می‌شود.

مدل برنامه‌ریزی پویا

در مدل برنامه‌ریزی پویای این مسئله، از آنجاکه می‌توان مقداری بیش از ظرفیت در دسترس رزرو انجام داد، لازم است متغیرهای حالت مسئله، به‌گونهٔ دیگری تعریف شود؛ بنابراین، در این مسئله به‌جای ظرفیت در دست (C_w, C_v)، از مقدار ظرفیتی که تاکنون رزرو شده (m_w, m_v) به‌عنوان متغیر حالت، علاوه‌بر متغیر زمان (t) استفاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی پویای مسئلهٔ کنترل ظرفیت در شرایط بهره‌برداری متغیر از ظرفیت، مطابق رابطهٔ ۲۱ است:

$$g(t, m_w, m_v) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i(t)\, max\{\rho_i + g(t-1, m_w + w_i, m_v + v_i), g(t-1, m_w, m_v)\} + \gamma_0(t).\, g(t-1, m_w, m_v) \quad (۲۱)$$

حال اگر $E[Z(.)]^+$ برابر با مقدار انتظاری ظرفیت مازاد در دسترس برای ارائه در زمان خدمت باشد، تابع جریمه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$g(0, m_w, m_v) = h \times (E[Z(m_w - C_w)]^+ + E[Z(m_v - C_v)]^+) \quad (۲۲)$$

در رابطهٔ ۲۲، h بیانگر نرخ جریمهٔ هر واحد از ظرفیت مازاد حجمی و وزنی است که مقدار آن بیش از درآمد بالاترین کلاس قیمتی تقاضا خواهد بود.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مدل برنامه‌ریزی پویای این مسئله نیز دارای سه متغیر حالت است که به فضای حافظهٔ زیادی برای حل نیاز دارد و با افزایش اندازهٔ مسئله، استفاده از این مدل چندان مناسب به‌نظر نمی‌رسد؛ بنابراین، نیاز به استفاده از روش‌های حل ابتکاری کارا برای مسئلهٔ فوق احساس می‌شود. در همین راستا، در بخش بعد سه روش ابتکاری برای مسئلهٔ فوق ارائه می‌شود.

روش‌های حل ابتکاری

در این بخش، سه تکنیک حل ابتکاری برای مسئله شامل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی توسعه‌یافته، تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویای توسعه‌یافته و روش قیمت پیشنهادی ارائه می‌شود.

➢ مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح توسعه‌یافته

مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح این بخش، درواقع یک حالت توسعه‌یافتهٔ مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قبلی است که فرض امکان رزرو مضاعف را درنظر گرفته است. فرض کنید β_i احتمال لغو درخواست کلاس قیمتی نوع i ام باشد. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح توسعه‌یافته به‌صورت زیر است:

$$max\, Z = \sum_{i=1}^{m} \rho_i x_i - h(u^w + u^v) \quad (۲۳)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \bar{w}_i x_i \le Z_w \quad (۲۴)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \bar{v}_i x_i \le Z_v \quad (۲۵)$$

$$\rho_i \ge r_i.\bar{w}_i \quad (۲۶)$$

$$\rho_i \ge r_i.\bar{v}_i/\lambda \quad (۲۷)$$

$$u^v \ge \sum_{i=1}^{I} \bar{v}_i\,.\,(x_i.(1-\beta_i)) - C_v \quad (۲۸)$$

$$u^w \ge \sum_{i=1}^{I} \bar{w}_i\,.\,(x_i.(1-\beta_i)) - C_w \quad (۲۹)$$

$$x_i \le \bar{D}_i \quad (۳۰)$$

$$Z_w \ge C_W \quad (۳۱)$$

$$Z_v \ge C_v \quad (۳۲)$$

$$x_i \ge 0, integer\,, u^v, u^w, Z_w, Z_v \ge 0 \quad (۳۳)$$

در مدل فوق، تابع هدف مسئله درآمد کل مورد انتظار را حداکثر می‌کند که مقدار کسرشده در تابع هدف، جریمهٔ

مربوط به تقاضاهای پذیرش‌شده اما سرویس‌دهی‌نشدهٔ مربوط به بحث رزرو مضاعف را نشان می‌دهد. روابط ۲۴ و ۲۵ بیان می‌کند که مقدار کل وزن و حجم رزروشده باید کمتر از حدود رزرو مضاعف وزنی و حجمی (Z_v, Z_w) باشد. روابط ۲۶ و ۲۷ مربوط به محاسبهٔ وزن قابل‌مطالبه است. روابط ۲۸ و ۲۹ بخشی از تقاضای پذیرش‌شده را نشان می‌دهد که قادر به سرویس‌دهی به آن نیستیم. رابطهٔ ۳۰ حداکثر تقاضای کلاس‌های قیمتی مختلف را نشان می‌دهد. روابط ۳۱ و ۳۲ نشان می‌دهد که مقدار رزرو مضاعف، حداقل برابر با ظرفیت کل در دسترس وزنی و حجمی است. در نهایت نیز رابطهٔ ۳۳ نوع متغیرهای مسئله را تعریف می‌کند.

➢ روش تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویای توسعه‌یافته

روش تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا درواقع مدل برنامه‌ریزی پویای مسئله را برحسب وزن و حجم به دو زیرمدل تبدیل می‌کند و در انتها، مجموع درآمد مورد انتظار دو مدل درآمد کل را نشان می‌دهد. مدل تجزیهٔ برنامه‌ریزی پویا برحسب وزن و حجم به‌صورت زیر است:

$$g(t,m_w)=\sum_{i=1}^{m}\gamma_i(t).max\{\acute{\rho}_i + g(t-1,m_w+w_i), g(t-1,m_w)\} + \gamma_0(t).g(t-1,m_w) \quad (۳۴)$$

$$g(0,m_w)=h.E[Z(m_w-C_w)]^+ \quad (۳۵)$$

$$g(t,m_v)=\sum_{i=1}^{m}\gamma_i(t).max\{\acute{\rho}_i + g(t-1,m_v+v_i), g(t-1,m_v)\} + \gamma_0(t).g(t-1,m_v) \quad (۳۶)$$

$$g(0,m_w,m_v)=h\times E[Z(m_v-C_v)]^+ \quad (۳۷)$$

$$gtotal(t)=g(t,m_w)+g(t,m_v) \quad (۳۸)$$

➢ روش قیمت پیشنهادی

تفاوت روش قیمت پیشنهادی (BP) ارائه‌شده در این بخش با روش ارائه‌شده برای مسئله با عدم امکان رزرو مضاعف، در نحوهٔ تعریف شرط اول پذیرش یک درخواست است که به‌صورت زیر خواهد بود:

$$V+v_i\le C_v \quad (۳۹)$$

$$W+w_i\le C_w \quad (۴۰)$$

$$V=\sum_{i=1}^{I}x_i.(1-\beta_i).v_i \quad (۴۱)$$

$$W=\sum_{i=1}^{I}x_i.(1-\beta_i).w_i \quad (۴۲)$$

$$\rho_i\ge v_i d_v+w_i d_w \quad (۴۳)$$

$$\rho_i=r_i\left(max\left\{w_i,\frac{v_i}{\gamma}\right\}\right) \quad (۴۴)$$

$$Rtotal=\sum_{i=1}^{m}\rho_i x_i \quad (۴۵)$$

در روابط فوق، (V,W) بیانگر وزن و حجم رزرو شده و لغونشده تاکنون است. رابطه‌های ۳۹ و ۴۰ دلالت بر شرط اولیه برای پذیرش یک درخواست، یعنی وجود ظرفیت کافی دارند (در این روابط Cw و Cv به ترتیب بیانگر ظرفیت وزنی و حجمی کل است). رابطهٔ ۴۳ شرط ثانویه یعنی بزرگ‌تربودن درآمد آن درخواست از مقدار حدود آستانه‌ای را بیان می‌کند. رابطهٔ ۴۵ نیز درآمد کل را نشان می‌دهد.

پس از معرفی و بیان دو مسئله و ارائهٔ روش حل برای هریک از آن‌ها، در بخش بعدی به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو مسئلهٔ فوق پرداخته می‌شود.

تجزیه و تحلیل عددی

در این بخش، عملکرد روش حل دقیق حاصل از برنامه‌ریزی پویا با روش‌های حل ابتکاری برای دو مسئلهٔ بیان‌شده ارزیابی می‌شود. برای تولید پارامترهای غیرقطعی مسئله شامل فرایند ورود درخواست‌ها و حجم و وزن درخواستی هریک از آن‌ها از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. ابتدا مفروضات و پارامترهای مدل شبیه‌سازی توصیف می‌شود. سپس برای حالت عدم امکان لغو درخواست، روش‌های معرفی‌شده اجرا می‌شود و ارزیابی نتایج صورت می‌گیرد. در ادامه، همین رویه برای حالت امکان لغو درخواست نیز انجام و یافته‌ها بررسی می‌شود. بررسی اثر رزرو مضاعف در درآمد مورد انتظار نیز مرحلهٔ آخر کار است.

توصیف فرایند شبیه‌سازی

اطلاعات کامل مورد نیاز مربوط به فرایند شبیه‌سازی و اطلاعات مربوط به دو مسئله، شامل قیمت هر کلاس تقاضا، نرخ ورود، تعداد دورهٔ رزرواسیون، توزیع حجم و وزن کلاس‌های قیمتی مختلف و درنهایت نرخ جریمهٔ مربوط به رزرو بیش از ظرفیت، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مسئله

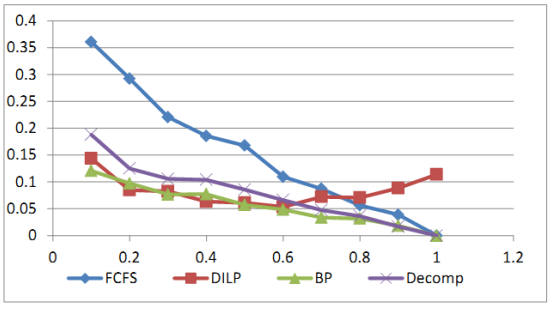
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تعداد کلاس‌ها	۳	W1	Lognormal(1,0.25)
Lambda1	۰/۰۳۵	W2	Lognormal(3,0.5)
Lambda2	۰/۰۲	W3	Lognormal(2,0.75)
Lambda3	۰/۰۱۵	V1	Lognormal(2,1)
T	۱۰۰۰	V2	Lognormal(4,1)
R1	۸	V3	Lognormal(3,1.5)
R2	۱۰	π_v	16
R3	۱۴	π_w	16

مطابق جدول ۱، سه کلاس قیمتی تقاضا درنظر گرفته شده است که دارای توزیع نمایی با نرخ ورود ۰/۰۳۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۱۵ و قیمت واحد ۸، ۱۰ و ۱۴ هستند. تعداد دورهٔ زمانی برابر با ۱۰۰۰ و نرخ جریمه برای حالت رزرو مضاعف، مقداری بیش از قیمت مربوط به بالاترین کلاس قیمتی و برابر با ۱۶ برای هردو بعد حجم و وزن درنظر گرفته می‌شود. با توجه به مثبت‌بودن مقادیر حجم و وزن درخواست‌ها، توزیع lognormal با مقادیر مختلف برای سه کلاس قیمتی تقاضا لحاظ شده است.

اجرا و تحلیل نتایج مسئله در حالت عدم امکان لغو درخواست

در این بخش، روش‌های ارائه‌شدهٔ مربوط به مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل بار در شرایط عدم امکان لغو درخواست اجرا و نتایج آن به ازای مقادیر مختلف نسبت ظرفیت به تقاضا - که با α نشان داده می‌شود - بررسی می‌شود؛ علاوه‌براین، به‌منظور بررسی نقش مدیریت درآمد در افزایش سودآوری، نتایج حاصل از تکنیک‌های پیشنهادی با سیاست FCFS - که در فرآیند رزرواسیون رایج است - مقایسه می‌شود. جدول ۲ مقدار درآمد کل مورد انتظار و همچنین زمان مورد نیاز برای حل مسئله را به ازای مقادیر مختلف α نشان می‌دهد.

به‌منظور کسب دید بهتر نسبت به عملکرد روش‌های ارائه‌شده، اختلاف درصدی میان روش‌های ابتکاری پیشنهادی و سیاست FCFS، نسبت به مقدار بهینهٔ حاصل از مدل برنامه‌ریزی پویا، به ازای مقادیر مختلف α در شکل ۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۲. اختلاف درصدی درآمد نسبت به مقدار بهینه (حالت امکان‌پذیرنبودن لغو درخواست)

شکل ۲ نشان می‌دهد که تکنیک مدیریت درآمد، عملکردی بسیار بهتر از سیاست FCFS دارد. شایان توجه اینکه در تمامی روش‌های پیشنهادی غیر از روش DILP، با افزایش نرخ α اختلاف آن‌ها نسبت به مقدار حاصل از حل

دقیق کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در $\alpha = 1$ این اختلاف به صفر می‌رسد که امری قابل‌پیش‌بینی است، زیرا در این حالت، مقدار تقاضا با ظرفیت برابر است و درنتیجه، همهٔ درخواست‌های ورودی پذیرش خواهد شد. آنچه بیشتر در اینجا حائز اهمیت است، زمانی است که ظرفیت در دسترس نسبت به تقاضا محدود باشد (α کوچک باشد)، زیرا سازمان‌ها اغلب با محدودیت ظرفیت مواجهند.

در همین راستا، همان‌طورکه نتایج جدول ۲ و شکل ۲ نشان می‌دهد، برای مقادیر $\alpha < ۰/۵$ روش‌های DILP و BP دارای کمترین اختلاف درصدی با مقدار بهینه هستند. در این میان، BP روند منطقی‌تری دارد.

اجرا و تحلیل نتایج مسئله در حالت امکان لغو درخواست

پس از بررسی مسئله در حالت عدم امکان لغو درخواست، در این بخش مسئله با امکان لغو درخواست - که حالت توسعه‌یافته‌تری از مسئلهٔ قبل است - بررسی می‌شود. در این مسئله، برای مقادیر رزرو بیش از ظرفیت (حجم و وزن) جریمه‌ای درنظر گرفته می‌شود که مقدار آن بیشتر از قیمت بالاترین کلاس قیمتی (مقدار ۱۴ در این مثال) است. در این تحقیق، مقدار نرخ جریمه ۱۶ واحد پولی درنظر گرفته شده است. جدول ۳ درآمد کل مورد انتظار و زمان حل را برای روش‌های مختلف پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف α نشان می‌دهد.

به‌منظور درک بهتر عملکرد روش‌های حل پیشنهادی، اختلاف درصدی درآمد کل هریک از آن‌ها نسبت به مقدار بهینه، به ازای مقادیر مختلف α، در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، بار دیگر شاهد روندی نزولی در اختلاف درصد میان مقدار بهینه و مقادیر حاصل از روش های حل ابتکاری با افزایش نرخ α (غیر از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی) هستیم. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در این حالت نیز به‌کارگیری مدیریت درآمد سبب افزایش درآمد در مقایسه با استفاده از سیاست FCFS شده است.

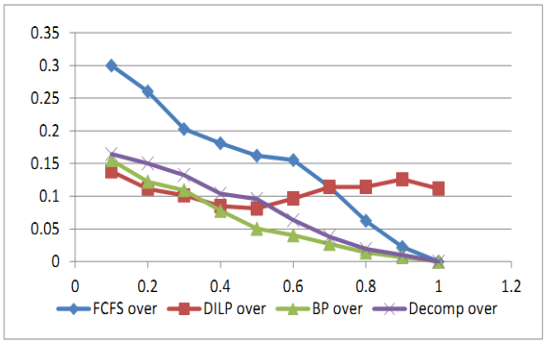
در انتها نیز مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که BP و DILP به ازای $\alpha \leq ۰/۵$ در مقایسه با روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارند. بار دیگر روش BP دارای روندی منطقی‌تر از روش DILP است.

جدول ۲. درآمد کل و زمان حل مربوط به مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل بار با عدم امکان لغو درخواست

α	FCFS		DILP		Bid-Price		Dynamic Programming		Decomposition	
	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا
۰/۱	۴۱۸	۵/۳	۵۶۰	۶/۴	۵۷۵	۴/۷	۶۵۴	۷/۲	۷۷۷	۶/۰
۰/۲	۸۶۶	۵/۷	۱۱۲۰	۷/۹	۱۱۰۵	۶/۴	۱۲۲۴	۱۲/۴	۱۳۷۷	۶/۳
۰/۳	۱۳۴۲	۵/۸	۱۵۸۰	۹/۰	۱۵۹۰	۸/۰	۱۷۲۲	۱۶/۴	۱۹۰۴	۶/۶
۰/۴	۱۷۴۸	۶/۰۰	۲۰۱۰	۱۱/۸	۱۹۸۰	۹/۹	۲۱۴۶	۲۰/۷	۲۳۶۹	۶/۸
۰/۵	۲۱۳۲	۶/۰۷	۲۴۰۵	۱۴/۱	۲۴۱۵	۱۲/۳	۲۵۶۲	۲۲/۲	۲۷۸۱	۷/۰
۰/۶	۲۶۴۸	۶/۵	۲۸۱۵	۱۷/۴	۲۸۳۰	۱۵/۶	۲۹۷۴	۲۶/۹	۳۱۷۱	۷/۵
۰/۷	۳۰۸۰	۶/۶	۳۱۳۰	۱۹/۹	۳۲۶۰	۱۷/۸	۳۳۷۴	۲۹/۴	۳۵۳۴	۷/۸
۰/۸	۳۵۲۴	۶/۸	۳۴۷۰	۲۰/۲	۳۶۱۵	۱۸/۹	۳۷۳۴	۳۵/۹	۳۸۷۰	۸/۳
۰/۹	۳۹۱۲	۷/۱	۳۷۱۰	۲۲/۵	۳۹۹۵	۲۰/۰	۴۰۷۰	۳۹/۹	۴۱۳۸	۸/۴
۱	۴۳۹۰	۷/۱	۳۹۰۰	۲۴/۴	۴۳۹۰	۲۲/۱	۴۳۹۰	۴۵/۱	۴۳۹۰	۸/۸

جدول ۳. درآمد کل و زمان حل مسئلهٔ کنترل ظرفیت حمل‌ونقل بار با امکان لغو درخواست

α	*FCFS*		*DILP*		*BP*		*Dynamic Programming*		*DPD*	
	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا	درآمد	زمان اجرا
۰/۱	۵۲۸	۷/۹	۶۵۰	۸/۹	۶۳۷	۴/۷	۷۵۴	۷/۹	۸۷۸	۹/۸
۰/۲	۱۰۲۴	۹/۳	۱۲۳۰	۹/۵	۱۲۱۵	۹/۷	۱۳۸۴	۱۴/۴	۱۵۹۲	۱۰/۱
۰/۳	۱۵۱۸	۱۰/۳	۱۷۱۱	۹/۹	۱۶۹۶	۱۳/۶	۱۹۰۴	۱۶/۴	۲۱۵۶	۱۲/۸
۰/۴	۲۰۵۲	۱۱/۱	۲۲۹۲	۱۵/۹	۲۳۱۰	۱۷/۹	۲۵۰۵	۳۳/۲	۲۷۶۵	۱۳/۶
۰/۵	۲۵۲۴	۱۱/۲	۲۷۶۷	۱۸/۵	۲۸۶۰	۲۲/۲	۳۰۱۲	۳۸/۱	۳۳۰۰	۱۵/۸
۰/۶	۲۹۳۱	۱۳/۵	۳۱۳۵	۲۳/۱	۳۳۳۰	۲۳/۷	۳۴۷۰	۴۲/۶	۳۶۹۰	۱۷/۳
۰/۷	۳۳۶۰	۱۳/۹	۳۳۶۰	۲۵/۹	۳۶۹۰	۲۸/۴	۳۷۹۳	۴۶/۲	۳۹۳۷	۱۷/۸
۰/۸	۳۹۰۷	۱۴/۳	۳۶۹۰	۳۱/۳	۴۱۰۸	۳۳/۹	۴۱۶۶	۵۰/۳	۴۲۴۶	۱۸/۳
۰/۹	۴۲۷۲	۱۴/۸	۳۸۲۰	۳۶/۵	۴۳۴۰	۳۷/۰	۴۳۷۰	۷۲/۹	۴۴۱۵	۲۰/۹
۱	۴۳۹۰	۱۵/۵	۳۹۰۰	۴۸/۸	۴۳۹۰	۴۲/۱	۴۳۹۰	۷۹/۱	۴۳۹۰	۲۱/۶



شکل ۳. اختلاف درصدی درآمد نسبت به مقدار بهینه (حالت امکان لغو درخواست)

بررسی اثر امکان لغو درخواست بر درآمد کل مورد انتظار

پس از اجرا و تحلیل عملکرد در دو حالت امکان و عدم امکان لغو درخواست، در این بخش اثر امکان لغو درخواست‌ها در فرایند رزرواسیون بررسی می‌شود. بدین‌منظور، در اینجا بررسی مقادیر بهینه برای حالت امکان و عدم امکان لغو درخواست صورت می‌گیرد. جدول ۴ مقادیر بهینهٔ این دو حالت را همراه با اختلاف درصدی میان آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسهٔ مقدار بهینه در حالت امکان‌پذیر بودن و نبودن لغو درخواست

α	بدون امکان لغو درخواست	با امکان لغو درخواست	اختلاف درصدی
۰/۱	۶۵۴	۷۵۴	۰/۱۵۲۹۰۵
۰/۲	۱۲۲۴	۱۳۸۴	۰/۱۳۰۷۱۹
۰/۳	۱۷۲۲	۱۹۰۴	۰/۱۰۵۶۹۱
۰/۴	۲۱۴۶	۲۵۰۵	۰/۱۶۷۲۸۸
۰/۵	۲۵۶۲	۳۰۱۲	۰/۱۷۵۶۴۴
۰/۶	۲۹۷۴	۳۴۷۰	۰/۱۶۶۷۷۹
۰/۷	۳۳۷۴	۳۷۹۳	۰/۱۲۴۱۸۵
۰/۸	۳۷۳۴	۴۱۶۶	۰/۱۱۵۶۹۴
۰/۹	۴۰۷۰	۴۳۷۰	۰/۰۷۳۷۱۰
۱	۴۳۹۰	۴۳۹۰	۰

همان‌طورکه در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در حالت امکان لغو درخواست، درآمد کل مورد انتظار در مقایسه با حالت عدم امکان لغو درخواست، به‌طور متوسط بیش از ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در انتها نیز باید به این نکته اشاره کرد که در حالت $\alpha = 1$، مقدار درآمد کل هردو حالت با هم برابر می‌شود. دلیل این امر، برابری ظرفیت و تقاضاست. به‌طورکلی می‌توان گفت که درآمد کل در شرایط امکان لغو درخواست، حداقل برابر با درآمد کل در حالت عدم امکان آن خواهد بود؛ به‌عبارت دیگر، مقدار درآمد در حالت عدم امکان لغو درخواست، یک حد پایین برای حالت امکان لغو درخواست است.

جمع‌بندی و پیشنهادها برای مطالعات آتی

در این تحقیق، مسئلهٔ مدیریت درآمد حمل هوایی بار در دو حالت امکان و عدم امکان لغو درخواست بررسی شد. مسئلهٔ دوم، حالت توسعه‌یافتهٔ مسئلهٔ اول است که شرط امکان لغو درخواست را در خود لحاظ می‌کند. با توجه به ماهیت پویای فرایند رزرواسیون و وابستگی آن به زمان، برنامه‌ریزی پویا روشی مناسب برای مدل‌سازی آن به‌شمار می‌رود. بدین‌ترتیب، در این تحقیق، برای هر دو مسئله مدل برنامه‌ریزی پویا ارائه شد. از آنجاکه مدل برنامه‌ریزی پویا برای یافتن جواب بهینه نیازمند حافظهٔ زیاد است، سه روش حل ابتکاری برای هریک از مسائل ارائه شده است.

برای تجزیه و تحلیل نتایج، از یک سو بررسی عملکرد روش‌های حل ابتکاری پیشنهادی نسبت به مقدار دقیق حاصل از برنامه‌ریزی پویا صورت گرفت و از سوی دیگر، به‌منظور بررسی نقش مدیریت درآمد در کسب درآمد بیشتر، نتایج حاصل از روش‌های پیشنهادی با نتایج حاصل از سیاست رزرواسیون FCFS مقایسه شد.

نتایج شبیه‌سازی، بیانگر عملکرد بهتر روش DILP و BP برای مقادیر $\alpha \leq 0.5$ بوده است؛ علاوه‌براین، از میان این دو روش نیز روش BP انطباق‌پذیری بیشتری با مقادیر بهینه در مقایسه با DILP دارد. به‌علاوه با مقایسهٔ مقادیر بهینه در حالت امکان‌پذیر بودن و نبودن رزرو مضاعف، مشاهده شد که لحاظ‌کردن شرط امکان رزرو مضاعف سبب افزایش بیش از ۱۰ درصدی درآمد می‌شود. در این تحقیق، از تکنیک‌های ابتکاری برای یافتن جواب مطلوب استفاده شد؛ بنابراین می‌توان استفاده از تکنیک‌های فراابتکاری مانند راهبرد تکامل گروهی[5] [۲۱] را گزینهٔ مناسبی برای انجام‌دادن مطالعات آتی در این زمینه دانست.

مراجع

1. Talluri, K.T. and Van Ryzin, G.J. (2006). *The theory and practice of revenue management* (Vol. 68), Springer Science & Business Media.
2. Boeing Company (2005b). World Air Cargo Forecast 2002–2003. *http://www.boeing.com/* commercial/ cargo/exec_summary.htm
3. Hendricks, G. and Kasilingam, R. (1993). *Cargo revenue management at American airlines cargo,* Presentation at the AGIFORS Cargo Study Group Meeting, Rome, Italy.
4. Slager, B. and Kapteijns, L. (2004). "Implementation of cargo revenue management at KLM", *Journal of Revenue & Pricing Management,* Vol. 3, No. 1, PP. 80–90.
5. Nielsen, K. (2004*). Revenue management at virgin Atlantic cargo,* Presentation at the AGIFORS Cargo Study Group Meeting, Washington DC, USA.
6. Karaesmen, I. Z. (2001). *Three essays on revenue management,* PhD Thesis, Columbia University.
7. Pak, K. and Dekker, R. (2004). Cargo revenue management: Bid-prices for a 0-1 multi knapsack problem (Technical report). Erasmus University, Erasmus Research Institute of Management, Rotterdam.
8. Huang, K. and Hsu, W. (2005). Revenue management for air cargo space with supply uncertainty, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 5, PP. 570–580.

9. Luo, L. and Shi, X. (2006). The stochastic model of multi-leg capacity allocation for air cargo revenue management, In *Proceedings of the international conference on service systems and service management*, Vol. 2, pp. 917-921, 25-27 Oct, Troyes, France.

10. Popescu, A., Keskinocak, P., Johnson, E., LaDue, M. and Kasilingam, R. (2006). "Estimating air-cargo overbooking based on a discrete show-up-rate distribution", *Interfaces*, Vol. 36, No. 3, PP. 248–258.

11. Amaruchkul, K., Cooper, W. L. and Gupta, D. (2007). "Single-leg air-cargo revenue management", *Transportation Science*, Vol. 41, No. 4, PP. 457–469.

12. Huang, K. and Chang, K.C. (2010). "An approximate algorithm for the two-dimensional air cargo revenue management problem", *Transportation Research: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, No. 3, PP. 426–435.

13. Zhuang, W., Gumus, M. and Zhang, D. (2011). "A single-resource revenue management problem with random resource consumptions", *Journal of the Operational Research Society*, (Advance online publication 14 December 2011, doi: 10.1057/jors.2011.129).

14. Han, D. L., Tang, L. C. and Huang, H. C. (2010). "A Markov model for single-leg air cargo revenue management under a bid-price policy", *European Journal of Operational Research*, Vol. 200, No. 3, PP. 800–811.

15. Levin, Y., Nediak, M. and Topaloglu, H. (2012). "Cargo capacity management with allotments and spot market demand", *Operations Research*, Vol. 60, No. 2, PP. 351–365.

16. Levina, T., Levin, Y., McGill, J. and Nediak, M. (2011). "Network cargo capacity management", *Operations Research*, Vol. 59, No. 4, PP. 1008–1023.

17. Hoffmann, R., (2013). *Dynamic Capacity Control in Air Cargo Revenue Management*, KIT Scientific Publishing.

18. Huang, K. and Lu, H. (2015). "A linear programming-based method for the network revenue management problem of air cargo", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, No. 59, PP.248–259.

19. Wang, X., (2016). "Stochastic resource allocation for containerized cargo transportation networks when capacities are uncertain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, No. 93, PP. 334–357.

20. Wannakrairot, A. and Phumchusri, N. (2016). "Two-dimensional air cargo overbooking models under stochastic booking request level, show-up rate and booking request density", *Computers & Industrial Engineering*, No. 100, PP. 1–12.

21. Kashan, A.H., Akbari, A.A. and Ostadi, B. (2015). "Grouping evolution strategies: An effective approach for grouping problems", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, No. 9, PP. 2703–2720.

واژه‌های لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Revenue Management (RM)
2. Deterministic Integer-linear Programming (DILP)
3. Bid Price (BP)
4. Dynamic Programming Decomposition (DPD)
5. Grouping Evolutionary Strategy (GES)