

بهینه‌سازی مسیریابی بار در راه آهن با استفاده از مدل‌های ریاضی

سید فرهاد افتخارزاده

دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود

جلیل شاهی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۰/۸/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۵/۱۵، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۱۸)

چکیده

راه‌های مختلفی برای نیل به کارآیی اقتصادی در یک سیستم ریلی وجود دارد. از جمله این راه‌ها که بویژه در شرایط کشور ما موفقیت بیشتری را نوید می‌دهد. مدیریت بهینه منابع با استفاده از بهینه‌سازی عملیات است. امروزه یکی از ابزارهای مهمی که برای این منظور در اختیار قرار دارد، استفاده از مدل‌های ریاضی است. در این رابطه می‌توان به سیستم‌های پشتیبان تصمیم اشاره نمود که هسته اصلی آنها را یک مدل بهینه‌سازی ریاضی تشکیل می‌دهد. در این مقاله که حاوی نتایج یک تحقیق دانشگاهی است، یک مدل بهینه‌سازی جدید برای سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی (میان مدت) ارائه شده است که مسئله تشکیل قطارهای باری در ایستگاههای راه آهن را مورد بررسی قرار می‌دهد. شناسایی گلوگاه‌ها، تعیین طول اقتصادی قطار، اولویت بندی زوج‌های تقاضا و تحلیل هزینه‌ها از جمله کاربردهای این مدل هستند. این مدل ابزار مناسبی برای مسیریابی جریان بار در شبکه و برنامه‌ریزی سرویس‌های باری تحت شرایط معین است. جواب بدست آمده از حل این مدل می‌تواند راهنمای مناسبی برای برنامه‌ریزی هوشمندانه توسط مدیران سیستم باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی عملیات، مدل‌های ریاضی، برنامه‌ریزی تاکتیکی، تشکیل قطارهای باری

مقدمه

امروزه بخش عمده‌ای از حمل‌ونقل بار به عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی در دنیا بر عهده راه آهن قرار دارد. در کشور ما نیز حمل و نقل بار از اهمیت ویژه‌ای برای راه آهن برخوردار بوده و در حدود ۹۰ درصد از درآمدهای بهره‌برداری راه آهن از محل حمل بار بدست می‌آید. شرایط رقابتی فشرده بین راه آهن و کامیون و بهره‌وری کم منابع در سیستم راه آهن، موجب کاهش سهم آن در بازار حمل و نقل گردیده است. سرمایه گذاری‌های سنگینی که در صنعت راه آهن صورت گرفته اند و منابع انسانی فراوانی که در این صنعت اشتغال دارد از یک سو پیچیدگی ذاتی فعالیت های راه آهن که از وابستگی شدید بین واحدهای مختلف و ماهیت پیوسته تولید ناشی می‌شود. از سوی دیگر، اتخاذ تصمیم‌های پیچیده را ایجاب می‌کند [۱]. این شرایط لزوم تلاش بیشتر برای بهبود روش‌ها و کاربرد روش‌های خردمندان را در برنامه‌ریزی آشکار می‌سازد. برای افزایش بازدهی و رسیدن به کارآیی اقتصادی در سیستم‌های ریلی راه‌های مختلفی وجود دارد. هر چند همه این راه‌حلها در صورت اجرای صحیح، بازدهی راه آهن را افزایش می‌دهند، لیکن مدیریت بهینه منابع (خط، ناوگان، نیروی انسانی) در کنار اصلاحات ساختاری در شرایطی که انجام پروژه‌های بزرگ سرمایه‌گذاری چه از لحاظ تامین سرمایه و چه از لحاظ زیست محیطی همواره با مشکلات بیشتری روبرو می‌شود، موفقیت بیشتری را نوید می‌دهد. اگر بخواهیم جایگاه مدیریت بهینه را در سلسله مراتب برنامه‌ریزی راه آهن مشخص کنیم، سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی بدلیل آنکه به مسائل مربوط به تخصیص بهینه منابع می‌پردازد، سطح مناسب تصمیم‌گیری برای مدیریت بهینه است. همانطور که در (جدول ۱) ملاحظه می‌شود، مسائلی که در این سطح تصمیم‌گیری می‌شوند، فرآیندهای عملیاتی میان مدت را در بر می‌گیرند. با توجه به اهمیت تخصیص منابع در کشورهای نظیر ایران و سهم قابل توجه هزینه‌های عملیاتی (رجوع شود به مقدمه‌های مرجع [۷]) هدف از این پژوهش را می‌توان به عنوان " ارائه روشی برای بهینه‌سازی عملیات حمل‌ونقل بار در سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی " بیان نمود.

امروزه بخش عمده‌ای از حمل‌ونقل بار به عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی در دنیا بر عهده راه آهن قرار دارد. در کشور ما نیز حمل و نقل بار از اهمیت ویژه‌ای برای راه آهن برخوردار بوده و در حدود ۹۰ درصد از درآمدهای بهره‌برداری راه آهن از محل حمل بار بدست می‌آید. شرایط رقابتی فشرده بین راه آهن و کامیون و بهره‌وری کم منابع در سیستم راه آهن، موجب کاهش سهم آن در بازار حمل و نقل گردیده است. سرمایه گذاری‌های سنگینی که در صنعت راه آهن صورت گرفته اند و منابع انسانی فراوانی که در این صنعت اشتغال دارد از یک سو پیچیدگی ذاتی فعالیت های راه آهن که از وابستگی شدید بین واحدهای مختلف و ماهیت پیوسته تولید ناشی می‌شود. از سوی دیگر، اتخاذ تصمیم‌های پیچیده را ایجاب می‌کند [۱]. این شرایط لزوم تلاش بیشتر برای بهبود روش‌ها و کاربرد روش‌های خردمندان را در برنامه‌ریزی آشکار می‌سازد. برای افزایش بازدهی و رسیدن به کارآیی اقتصادی در سیستم‌های ریلی راه‌های مختلفی وجود دارد. هر چند همه این راه‌حلها در صورت اجرای صحیح، بازدهی راه آهن را افزایش می‌دهند، لیکن مدیریت بهینه منابع (خط، ناوگان، نیروی انسانی) در کنار اصلاحات ساختاری در شرایطی که انجام پروژه‌های بزرگ سرمایه‌گذاری چه از لحاظ تامین سرمایه و چه از لحاظ زیست محیطی همواره با مشکلات بیشتری روبرو می‌شود، موفقیت بیشتری را نوید می‌دهد. اگر بخواهیم جایگاه مدیریت بهینه را در سلسله مراتب برنامه‌ریزی راه آهن مشخص کنیم، سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی بدلیل آنکه به مسائل مربوط به تخصیص بهینه منابع می‌پردازد، سطح مناسب تصمیم‌گیری برای مدیریت بهینه است. همانطور که در (جدول ۱) ملاحظه می‌شود، مسائلی که در این سطح تصمیم‌گیری می‌شوند، فرآیندهای عملیاتی میان مدت را در بر می‌گیرند. با توجه به اهمیت تخصیص منابع در کشورهای نظیر ایران و سهم قابل توجه هزینه‌های عملیاتی (رجوع شود به مقدمه‌های مرجع [۷]) هدف از این پژوهش را می‌توان به عنوان " ارائه روشی برای بهینه‌سازی عملیات حمل‌ونقل بار در سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی " بیان نمود.

جدول ۱: سلسله مراتب برنامه‌ریزی در راه‌آهن.

سطح برنامه‌ریزی (تصمیم‌گیری)	میدان تاثیر	افق زمانی	هزینه سرمایه‌گذاری	مسئله برنامه‌ریزی
راهبردی (مدیریت عالی، مرکزیت)	تعیین راهبردی برای کل سیستم	دراز مدت	زیاد	۱- طراحی شبکه ۲- مکانیابی ۳- تحصیل منابع لازم برنامه‌ریزی و میسر یابی کلان سرویس‌ها
تاکتیکی (مدیریت میانی، واحی)	تخصیص منابع موجود بنحو کارآمد و منطقی برای بهبود عملکرد کلی سیستم	میان مدت (ماه‌بانه یا فصلی)	کم و متوسط	۵- طراحی شبکه سرویس ۶- توزیع و مسیر یابی ترافیک ۷- تعیین سیاستهای ایستگاهی ۸- توزیع وسائل نقلیه خالی
عملیاتی (مدیریت محلی، ایستگاه)	روزمره	کوتاه مدت (روزانه)		۹- زمان بندی سرویس‌ها ۱۰- اعزام قطارها ۱۱- تخصیص منابع ایستگاهی

مأخذ: مرجع [۷]

روش پژوهش

امروزه مدیریت راه‌آهن‌ها، بدلیل مشکلاتی که در انجام سرمایه‌گذاری‌های زیر بنایی وجود دارد، بدنبال استفاده هر چه بیشتر از ابزارهای تحلیلی رایانه‌ای به منظور بهینه سازی عملیات بوده و تلاش زیادی برای تحقیقات مربوطه بکار می‌برند.

هسته اصلی این سیستم‌ها را یک مدل بهینه‌سازی ریاضی تشکیل می‌دهد. این مدل‌ها ابزاری مناسب برای تسهیل و پیشبرد فعالیت‌های گوناگون برنامه‌ریزی بوده و از طریق مقایسه گزینه‌ها با یکدیگر اطلاعات با اهمیتی را فراهم می‌آورند. بدیهی است که جایگاه مدل مورد نظر تابع طبقه‌بندی مسئله در سلسله مراتب برنامه‌ریزی است. سطح جامعیت و ساختار مدل نیز به این طبقه‌بندی بستگی دارد.

سیستم جهان واقع دارای خصوصیات غیر خطی است. یک تحلیل‌گر سیستم که با مدل سروکار دارد، خصوصیات واقعی سیستم را به فرض آنکه بتوان کلیه آنها را به صورت کمی بیان نمود، به کمک توابع عددی مناسب ساده سازی می‌کند.

با توجه به توان محاسباتی در دسترس و قابلیت‌های فردی معمولی، هر قدر مدل انتزاعی بدست آمده ساده‌تر باشد، از دقت (واقع‌گرایی) کمتری برخوردار بوده، لیکن از آنجائی که حل آن به کمک روش‌های محاسباتی آسانتر است، جواب دقیقتری از مسئله بدست خواهد داد. البته تحلیل‌گر باید بر اساس آشنایی قبلی با سیستم حدود ساده‌سازی را به اندازه‌ای تعیین کند که به دقت مدل لطمه وارد نیاید. در هر صورت یادآوری این نکته ضروری است که تحلیل کمی به تنهایی برای رسیدن به تصمیم مناسب کافی نخواهد بود و تحلیل ذهنی و تجربه نیز در فرآیند تصمیم‌گیری و برای حل مسئله از اهمیت زیادی برخوردارند.

مدل ریاضی برنامه‌ریزی تشکیل قطارهای

باری

مقدمه

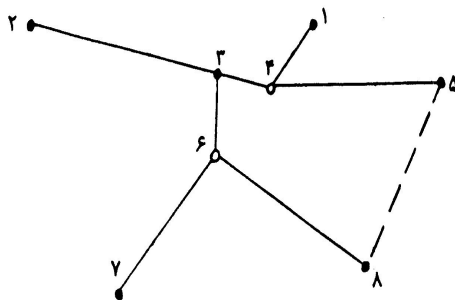
تقاضا در راه‌آهن بر حسب تناژ بار حمل شده (یا تعداد واگن‌های جابجا شده) بین مبادی و مقاصد بیان می‌شود.

عملیاتی صرفه جویی نمود. تشکیل قطار یکی از مسائل با اهمیت در برنامه ریزی ریلی است که تاکنون برای حل آن مدل‌های گوناگونی ارائه شده‌اند. در این بخش در ادامه کارهای قبلی فرمولبندی جدیدی ارائه خواهد شد.

فرضیات

معمولا شبکه و داده‌های مربوطه برای مقاصد برنامه‌ریزی تاکتیکی، به صورت مجتمع در نظر گرفته می‌شوند. برای این منظور تخلیه و بارگیری‌های مربوط به اکثر ایستگاه‌های به نزدیک ترین ایستگاه اصلی تخصیص داده می‌شوند [۳] و [۵] به این ترتیب شبکه‌ای متشکل از تعدادی گره که نمایانگر ایستگاهها و تعدادی پیوند که نمایانگر خطوط راه‌آهن هستند، بدست خواهد آمد. (شکل ۱)

در برنامه‌ریزی راه‌آهن، تقاضا بر اساس مبدا و مقصد محموله و خصوصیات فیزیکی کالا طبقه بندی (ترافیکی) می‌شود. در سطح برنامه‌ریزی تاکتیکی، طبقات ترافیکی کم اهمیت در نظر گرفته نمی‌شوند. در صورت عدم دسترسی به داده‌های مربوطه، جریان واگن‌های خالی را نیز می‌توان از ماتریس تقاضا پیش‌بینی نمود و به عنوان یک طبقه ترافیکی مستقل در نظر گرفت [۳]. (جدول ۲)



شکل ۱: شبکه فرضی مبتنی بر شبکه راه آهن موجود کشور (توسعه آتی).

- ۱- ناحیه شمالی (ساری)
- ۲- نواحی آذربایجان و شمال غرب (تبریز)
- ۳- ناحیه تهران (تهران)
- ۴- ایستگاه گرمسار
- ۵- نواحی خراسان و شمال شرق (مشهد)
- ۶- ایستگاه قم
- ۷- نواحی جنوب، لرستان و اراک (اهواز)
- ۸- نواحی جنوب شرق، هرمزگان و اصفهان (بافق)

برای حمل این تقاضا راه‌آهن سیاست‌های عملیاتی معینی را بکار می‌برد. در صورتیکه تقاضا از اهمیت کافی برخوردار باشد، از قطارهای مستقیم استفاده می‌شود و اگر اهمیت محموله به اندازه‌ای نباشد که اعزام قطارهای مستقیم را توجیه نماید، باید ابتدا بار کافی برای تشکیل یک قطار کامل فراهم شود. از آنجائی که واگن‌ها دارای مقصدهای گوناگون و حامل کالاهای متفاوتی هستند، برای رسیدن این محموله‌ها به مقاصد مربوطه قطارها در ایستگاه‌های میانی تفکیک و واگن‌ها دوباره دسته بندی می‌شوند. برای این منظور واگن‌ها ابتدا گروه بندی شده و واگن‌های با مقصد مشابه در یک گروه هم مقصد (بلوک) قرار می‌گیرند. در صورتیکه تعداد واگن‌های هم مقصد برای تشکیل و اعزام یک قطار کامل (مرکب از یک بلوک واحد) کافی نباشد، قطاری مرکب از بلوک‌های گوناگون تشکیل و واگن‌ها الزاما در ایستگاه‌های میانی دسته بندی دوباره میشوند و سفر خود را در آرایش‌ها (سرویس‌ها) گوناگون تا رسیدن به مقصد نهایی ادامه می‌دهند. بدیهی است که هر قدر برنامه‌ریزی بهتری در ایستگاه مبدا برای تشکیل قطار صورت بگیرد، عمل دسته بندی میانی، زمان کمتری خواهد برد.

تشکیل و تنظیم قطار عبارت است از تعیین آرایش واگن‌ها در قطار، تنظیم وزن، طول و فشار ترمز بر اساس مقادیر مندرج در برنامه حرکت و تعیین ترکیب واگن‌ها بر اساس مبدا و مقصد. در یک شبکه ریلی، از آنجائی که تشکیل قطارهای مستقیم تنها در موارد خاصی (مثلا سنگ آهن) مقرون به صرفه است، واگن‌ها برای رسیدن به مقصد در سرویس‌های متعدد قرار می‌گیرند. مسئله در اینجا عبارت از تعیین خط سیر بهینه واگن‌ها و یا ترکیب سرویس‌ها در شبکه است به نحوی که هزینه کل عملیات کمینه شود. در شبکه‌های پر تراکم شطرنجی از آنجائی که مسیره‌های فیزیکی متعددی وجود دارند، انتخاب خط سیر بهینه کار چندان آسانی نیست، در حالی که در شبکه‌های درختی که در آنها تعداد مسیره‌های فیزیکی محدود است، (مثل شبکه ایران) تشکیل قطارها معمولا بر اساس نیاز روزانه برنامه‌ریزی می‌شود. با وجود این، در این جا نیز می‌توان با انتخاب ترکیبی مناسب از سرویس‌های ارائه شده، حجم عملیات میانی را کاهش داده و در هزینه‌های

فرصت با احتساب درآمدهای از دست رفته در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که هزینه‌های عملیاتی به کمک هزینه واحد محاسبه می‌شوند. همچنین از آنجایی که هزینه‌های ثابت ارائه سرویس‌ها سهم بزرگی از هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهند این هزینه‌ها به طور جداگانه در تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند [۶]. در نتیجه تابع هدف را می‌توان بصورت‌های زیر بیان نمود:

هزینه کل سیستم = (هزینه ارائه سرویس‌ها + هزینه جریان واگن‌ها)

یا

هزینه کل سیستم = (هزینه‌های تاخیر + هزینه‌های عملیاتی)

یا

هزینه کل سیستم = (هزینه‌های عملیاتی در ایستگاهها + هزینه‌های سیر در مسیر)

محدودیت‌ها

بطور کلی هر قدر فرمولبندی مدل پیچیده‌تر و تعداد محدودیت‌های آن بیشتر باشد، حل مدل مشکل‌تر می‌شود و انعطاف پذیری آن کاهش می‌یابد و در نتیجه فضای تجدید نظر و داوری برای مدیران و برنامه ریزان تنگ تر می‌شود. لذا باید همواره در تعیین محدودیت‌ها حد متوازی بین واقع‌گرایی و انعطاف پذیری رعایت گردد. با توجه به آنچه گفته شد فرمولبندی مورد نظر باید حداقل محدودیت‌های تقاضا و تعادل جریان و ظرفیت را در برداشته باشد، در حالی که در نظر گرفتن محدودیت طول قطار و ظرفیت ایستگاه در "فرمولبندی" ضرورتی ندارد.

همچنین به منظور تضمین حداقل کیفیت سرویس لازم، باید برای زمان سفر از مبادی به مقاصد در مدل سقفی (حد بالایی) در نظر گرفته شود. محدودیت انتخاب مسیر از طریق انتخاب مقادیر اولیه مناسب برای پارامترها اعمال می‌شود. (توضیح: این کار به وسیله برنامه ریز انجام می‌شود)، در نتیجه مسئله فوق که دارای ساختار یک مسئله جریان شبکه از نوع چند محموله ای " است به یک فرمول بندی اعداد صحیح ترکیبی " منجر خواهد شد که هم متغیرهای اعداد صحیح و هم متغیرهای پیوسته را در بر می‌گیرد.

از آنجایی که در این مدل از نشان دادن حرکات تبدالی در داخل ایستگاهها صرف نظر شده است، سیاستهای بلوک بندی بصورت صریح در نظر گرفته نمی‌شوند.

برای نشان دادن سرویس‌های مورد نیاز برای جابجا کردن تقاضا از مبادی به مقاصد از مفهوم شبکه سرویس استفاده می‌شود. هر سرویس بوسیله مسیر فیزیکی، توالی ایستگاهها، تنوع و تواتر سرویس مشخص می‌شود. بلکه " سرویس " عبارت است از یک نگاره جهت دار که در آن هر کمان نمایانگر یک سرویس ارائه شده است. برای هر زوج مبدا/ مقصد، می‌توان یک " زیر شبکه سرویس " تعریف نمود [۳] و [۶]. همانطور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود در مورد زوج تقاضای (۸/۵) تنها با توسعه فیزیکی شبکه از طریق اتصال مستقیم گره (۵) به گره (۸) امکان توسعه شبکه سرویس از طریق برقراری سرویس مستقیم بوجود خواهد آمد.

هم چنین در مدل جامع بدست آمده، برای هر زوج تقاضا حداقل یک مسیر فیزیکی و برای هر مسیر فیزیکی حداقل یک خط سیر وجود دارد. یک خط سیر نحوه سفر محموله را از مبدا تا مقصد مشخص می‌کند. هر خط سیر حداقل بوسیله یک سرویس ارائه شده تحقق پیدا می‌کند. در مورد مثال فوق واگن‌ها برای رسیدن از گره (۵) به گره (۸) در وضعیت فعلی شبکه میتوانند از طریق خط سیر (۱) با تعویض سرویس در گره میانی (۳) و یا از طریق خط سیر (۲) بطور مستقیم سفر کنند. در حالیکه در مسیر جدید تنها یک سرویس مستقیم (یک خط سیر) ارائه می‌شود. با وجود این، مزیت مسیر جدید در کوتاه بودن آن است. در هر حال شبکه سرویس آتی نسبت به شبکه سرویس فعلی دارای حق انتخاب و انعطاف بیشتری است.

اجزاء مدل

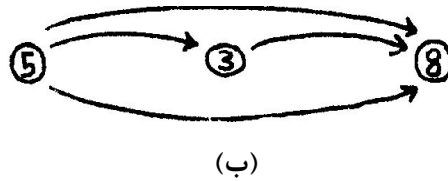
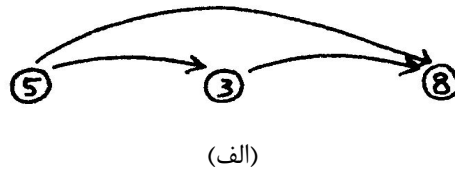
تابع هدف

همانطور که از مطالب قبلی نتیجه می‌شود، مسئله را می‌توان به صورت تعیین مسیر جریان‌های تقاضا (واگن‌ها) برای شبکه سرویس معین با هدف کمینه کردن هزینه کل سیستم بیان نمود. هزینه‌هایی که در اثر پایین بودن سطح سرویس ارائه شده بر مشتری تحمیل می‌شوند، بعنوان هزینه‌های تاخیر در نظر گرفته می‌شوند. تاخیر ناشی از تراکم در گلوگاه‌های سیستم بعنوان هزینه‌های

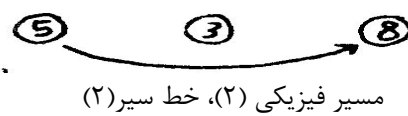
جدول ۲: ماتریس نهائی تقاضا بر حب واکن برای شبکه راه آهن ایران.

مقصد	۱	۲	۳	۵	۷	۸
مبدا	۱	۲	۳	۵	۷	۸
۱	×	۱۱	۴۶	۶	۱۰	۱۰
۲	۱۳	×	۱۰۹	۲۳	۳۶	۳۶
۳	۲۹	۸۹	×	۴۹	۷۷	۷۵
۵	۷	۱۹	۴۵	×	۱۷	۴۷
۷	۱۱	۳۱	۳۶	۱۸	×	۱۰۴
۸	۲۳	۶۷	۸۳	۳۹	۶۰	×

مأخذ: مرجع [۷]
L۷.



شکل ۲: زیر شبکه سرویس برای زوج تقاضای (۸/۵) الف) در شبکه موجود (ب) در توسعه آتی.



شکل ۳: نحوه نمایش مسیرهای فیزیکی و خط سیرها برای زوج تقاضای (۸/۵).

فرمول بندی ریاضی [۷]

مدل جامع

تابع هدف

کمینه کن:

$$Z = ۳۶۵ \times \left\{ \left[\sum_i \sum_j \alpha_{ij} (Z_v + Z_r) + Z_r \right] \right\}$$

(۱) [ریال]

در اینجا مدول ها

$$Z_v = C_j^v \cdot x_{ij}$$

$$Z_r = \sum_k \delta_{kj} C_k^r \cdot x_{ij}$$

$$Z_r = \sum_t C_t^r \cdot Y_t$$

محدویت‌ها

(۲) ارضای تقاضا

برای هر زوج تقاضای $i \in p$

$$\sum_j \alpha_{ij} x_{ij} = DEM_i$$

(۳) تعادل جریان

برای هر گره $k \in D$

$$\sum_i \sum_j \delta_{kj} x_{ij} - \sum_i \sum_j \omega_{kj} x_{ij} = 0$$

(۴) طول قطار

برای هر سرویس $t \in T$

$$\sum \alpha_{ij} \sigma_{ij} x_{ij} \leq TS$$

(۵) ظرفیت خط

برای هر پیوند $m \in L$

$$\cdot / ۵ \times \sum_i \tau_{mt} Y_t \leq CAP_m$$

(۶) ظرفیت ایستگاه

برای هر گره $k \in D$

$$\sum_i \sum_j \delta_{kj} \cdot x_{ij} \leq YCAP_k$$

(۷) زمان سفر

برای هر زوج تقاضا $i \in P$ و هر خط سیر $j \in A$

$$\sum_t \sigma_{ij} \sum_m \tau_{mt} \frac{DIS_m}{V_m} \leq T_i$$

(۸) قید نا منفی بودن و عدد صحیح بودن

برای همه زوج های $i \in P$ و خط سیرهای $j \in A$:

و عدد صحیح

$$x_{ij} \geq 0$$

برای همه زوجهای $i \in P$ خط سیرهای $j \in A$ ، گره

های $k \in D$ ، سرویس های $t \in T$ و پیوندهای $m \in L$

$$\alpha_{ij}, \delta_{kj}, \omega_{kj}, \sigma_{ij}, \tau_{mt} = (0, 1)$$

به منظور افزایش انعطاف پذیری مدل، در فرمولبندی "جامع" (رابطه ۱)، تابع هدف به اجزاء قابل پیش‌بینی تفکیک شده و به صورت ترکیب‌های مختلف (گونه‌ها) از ۳ مدل جداگانه و بدون توجه به امکان‌پذیری جواب بیان شده است. در عمل بنابر شرایط خاص شبکه مورد بررسی و سیاست‌های مدیریتی و راهبردی راه‌آهن مربوطه و یا به منظور آزمایش سیاست‌های گوناگون می‌توان از گونه‌های مختلف استفاده نمود (جدول ۳).

جدول ۳: ترکیب مدول‌ها در گونه‌های مختلف

Z_3 هزینه‌های ثابت	Z_2 هزینه‌های ایستگاهی	Z_1 هزینه‌های سیر در مسیر	مدول گونه
×	×	×	۱
×	-	×	۲
-	×	×	۳

حل مدل

علیرغم جامعیت مدل پیشنهادی، بدلیل سادگی و متعارف بودن فرمولبندی و ساختار بدست آمده برای حل آن از روش جا افتاده شاخه و کران که در اغلب نرم افزارهای تجاری برای حل برنامه های عدد صحیح با ابعاد معمولی بکار می رود استفاده می شود. در این روش مهمترین عامل برای تسهیل در محاسبات، کاهش تعداد متغیرهای عدد صحیح است که اینکار در مدل پیشنهادی از طریق "مدول بندی" تابع هدف انجام شده است.

نتیجه گیری

• با تعیین کران های پایینی برای پارامترهای حدی می توانیم شرایط بهینه شدن سیستم را تعیین نموده و با مقایسه این شرایط با وضعیت موجود، گلوگاه های آن را مشخص نمائیم. به عنوان مثال در جدول (۴) اگر ظرفیت ایستگاه (۲) از ۲۱۰ کمتر باشد، مدل جواب بهینه نخواهد داد.

• محدودیت زمان سفر یک محدودیت کیفی و در جهت ارتقاء سطح سرویس مشتری است، لیکن اعمال این محدودیت باعث افزایش هزینه ها می گردد. از سوی دیگر همانطور که از جدول (۵) پیداست حساسیت زوجها (افزایش هزینه ها) نسبت به این محدودیت متفاوت است. در نتیجه می توانیم اعمال این محدودیت را تنها به زوجها حساس محدود نمائیم.

• اگر محدودیت طول قطار را در مدل اعمال نمائیم، در عمل با سر ریز شدن برخی از سرویس ها مواجه خواهیم شد. اعزام قطارهای کوتاهتر متناظر با سرویس های مستقیم هر چند باعث کاهش هزینه های تاخیر می شود، لیکن هزینه های ثابت را افزایش خواهد داد. در نتیجه به جای اعمال محدودیت طول قطار در مدل، بهتر است این

موازنه و تعیین طول قطار مجاز بوسیله فرد برنامه ریز انجام شود که بعنوان راهنما می تواند از معیار "طول قطار اقتصادی" استفاده نماید جدول (۶).

• راه آهن به عنوان ستون فقرات سیستم حمل و نقل و به عنوان یک موسسه اقتصادی باید توان خود را در وهله اول برای ارضای تقاضاهای عمده و محورهای حیاتی بکار گیرد. برای این منظور می توان تقاضاهایی را که از رتبه پایین تری برخوردار هستند از برنامه سرویس خارج نمود. مطابق جدول (۷) زوج (۸) از بیشترین اولویت و زوجهای (۳) و (۴) از کمترین اولویت برخوردارند.

درصد زیاد هزینه های ثابت موجب می شود که سیاستهای سنتی راهبردی نسبت به سیاستهای ارتقاء سرویس از مزیت بیشتری برخوردار شوند. برای جلوگیری از کاهش سهم راه آهن باید نسبت به کاهش هزینه های ثابت اقدام نمود. بر اساس جدول (۸)، هزینه های نگهداری سهم قابل توجهی (۶۰ درصد) از هزینه های ثابت را به خود اختصاص می دهند. با بکار گیری فن آوری مدرن و برنامه ریزی بهینه بریا نگهداری تجهیزات می توان به کاهش هزینه های ثابت کمک نمود و زمینه اجرای سیاست مشتری گرا را فراهم کرد.

• این مدل ابزار مناسبی برای مسیریابی جریان کالا و برنامه ریزی سرویس ها برای قطارهای باری تحت شرایط معین است، لیکن برای رسیدن به نتایج مورد نظر به انتخاب ترکیب ورودی ها بستگی دارد. جواب بدست آمده از حل معادله می تواند در نهایت بعنوان راهنمای مناسبی برای برنامه ریزی هوشمندانه توسط مدیران مجرب سیستم مورد استفاده قرار بگیرد. جدول (۹) خروجی مدل آرایش ۱۴ سرویس (خط سیر) انتخابی aij تعداد واکن های سرویس j مربوط به زوج تقاضای i را نشان می دهد

جدول ۴: کران های پایینی برای پارامترهای حدی.

پارامتر	کران پائینی (مقدار اولیه)
طول قطار مجاز (۱) (واگن)	۲۵ (۳۰)
زمان سفر مجاز (۸) (ساعت)	۱۹ (۲۰)
ظرفیت ایستگاه $\left(\frac{\text{یلوک}}{\text{روز}}\right)$	۲۱۰ (۲۵۰)
(۲)	

جدول ۵: اختلاف هزینه برای زوجهای مختلف با محدودیت سفر و بدون آن.

زوج تقاضا (i)	حداقل زمان سفر (ساعت)	زمان سفر مجاز (ساعت)	هزینه با محدودیت (ریال)	هزینه بدون محدودیت (ریال)	اختلاف هزینه (ریال)	اختلاف هزینه (%)
۳	۱۰	۹	۱۱۴۴۳	۹۷۵۷	۱۶۸۶	۱۴/۷
۴	۸/۳۴	۸	۱۱۶۴۴	۹۷۵۷	۱۸۸۷	۱۶/۲
۶	۸/۳۴	۸	۱۲۹۲۹	۱۱۰۴۱	۱۸۸۸	۱۴/۶
۸	۱۸/۳۴	۱۸	۱۱۴۴۳	۱۱۲۴۳	۲۰۰	۱/۷

جدول ۶: روش تعیین طول قطار اقتصادی بعنوان مقدار بهینه برای حد طول قطار مجاز برای سرویس (۳).

طول قطار مجاز (واگن)	حالت جواب	مقدار هدف (میلیون ریال)	تواتر سرویس (قطار در روز)	تعداد واگنها	TC(2) (ساعت)	DELAYC(2) (ساعت)	DELAYA(3) (ساعت)	DELAYL(3) (ساعت)	هزینه تاخیر یک واگن (ریال)	هزینه تاخیر واگن ها (میلیون ریال)	هزینه ثابت یک قطار (میلیون ریال)	هزینه کل (میلیون ریال)
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵) = (۱) × (۴)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)*	(۱۱) = ۲۶۵ × (۱۰) × (۵)	(۱۲)**	(۱۳) = (۴) × (۱۲)
۲۶	ناممکن	۱۳۱۰۵	۷	۱۸۲	۲/۲۱	۱/۹۸	-	۱۹/۷۵	۱۲/۲۸	۰/۸۱	۱/۶۴	۱۱/۴۵
۲۷	بهینه کلی	۱۳۱۳۰	۷	۱۸۵	۲/۲۶	۲/۱۵	-	۱۹/۷۵	۱۲/۳۷	۰/۸۳	۱/۶۴	۱۱/۴۵
۳۷	بهینه کلی	۱۳۱۳۰	۵	۱۸۵	۲/۲۷	۵/۱۹	-	۱۹/۷۵	۱۴/۰۹	۰/۹۵	۱/۶۴	۸/۱۸
۴۷	بهینه کلی	۱۳۱۳۰	۴	۱۸۵	۳/۱۹	۲۰/۱۴	-	۱۹/۷۵	۲۲/۵۴	۱/۵۲	۱/۶۴	۶/۵۴
۴۸	بهینه کلی	۱۳۱۳۰	۴	۱۸۵	۳/۲۴	۲۵/۴۲	-	۱۹/۷۵	۲۵/۵۲	۱/۷۲	۱/۶۴	۶/۵۴

$$[۷] \leq \frac{Q \times R}{24 \times 365} [(۷) + (۸) + (۹)]^* \quad ** \text{ رک جدول (۵-۹) مرجع [۷]}$$

جدول ۷: رتبه بندی زوجهای تقاضا بر اساس سهم آنها در هزینه کل.

رتبه	سهم (٪)	کل (میلیون ریال)	هزینه زوج تقاضا
۳	۲۳/۳۴	۹۷۵۷	۳
۴	۲۳/۳۴	۹۷۵۷	۴
۲	۲۶/۴۱	۱۱۰۴۱	۶
۱	۲۶/۸۹	۱۱۲۴۳	۸

جدول ۸: سهم اجزاء هزینه های ثابت .

اجزاء هزینه سرویس	کارکنان قطار	(%)	سوخت	(%)	نگهداری	(%)	جمع هزینه های ثابت	(%)
۱	۲۰۸،۳۳۳	۱۸/۶	۵۰۰،۲۴۰	۲۱/۵	۰۰۰،۶۷۰	۵۹/۹	۱،۸۳۳،۱۱۸	۱۰۰
۲	۲۵۰،۰۰۰	۱۸/۶	۶۰۰،۲۸۸	۲۱/۵	۰۰۰،۸۰۴	۵۹/۹	۳۴۲،۶۰۰،۱	۱۰۰
۳	۲۵۰،۰۰۰	۲۱/۵	۵۰۰،۲۴۰	۲۰/۷	۰۰۰،۶۷۰	۵۷/۷	۵۰۰،۱۶۰،۱	۱۰۰
۴	۲۵۰،۰۰۰	۲۱/۵	۵۰۰،۲۴۰	۲۰/۷	۰۰۰،۶۷۰	۵۷/۷	۵۰۰،۱۶۰،۱	۱۰۰
۵	۴۵۸،۳۳۳	۱۸/۶	۱۰۰،۵۲۹	۲۱/۵	۰۰۰،۱۴۷۴	۵۹/۹	۲۴۶۱۴۳۳	۱۰۰
جمع	۶۶۶،۴۱۶،۱		۲۰۰،۵۳۹،۱		۰۰۰،۲۸۸،۴		۷،۸۶۶،۲۴۳	
(%)	۱۹/۵۶		۲۱/۲۵		۵۹/۱۹		۱۰۰	

جدول ۹: آرایش بدست آمده از حل مدل.

خط سیر	آرایش مورد بررسی				مقدار بهینه				
۱	$a_{2,1}$	$a_{3,1}$	$a_{7,1}$	$a_{8,1}$	۱۱	۴۹	۱۰	۱۰	
۲	$a_{3,2}$	$a_{5,2}$			۴۶	۶			
۳	$a_{9,3}$	$a_{11,3}$	$a_{13,3}$	$a_{15,3}$	$a_{16,3}$	۱۳	۱۰۹	۲۳	۳۶
۴	$a_{2,4}$	$a_{18,4}$	$a_{34,4}$	$a_{50,4}$	$a_{58,4}$	۱۱	۸۹	۱۹	۳۱
۵	$a_{9,5}$	$a_{17,5}$	$a_{49,5}$	$a_{57,5}$		۱۳	۲۹	۱۱	۲۳
۶	$a_{13,6}$	$a_{21,6}$	$a_{53,6}$	$a_{61,6}$		۲۳	۴۹	۱۸	۳۹
۷	$a_{7,7}$	$a_{15,7}$	$a_{23,7}$	$a_{39,7}$		۱۰	۳۶	۷۷	۱۷
۸	$a_{8,8}$	$a_{16,8}$	$a_{24,8}$	$a_{40,8}$		۱۰	۳۶	۷۵	۴۷
۹	$a_{33,9}$					۷			
۱۰	$a_{34,10}$	$a_{35,10}$		$a_{39,10}$	$a_{40,10}$	۱۹	۴۵	۱۷	۴۷
۱۱	$a_{49,11}$	$a_{50,11}$		$a_{51,11}$	$a_{53,11}$	۱۱	۳۱	۳۶	۱۸
۱۲	$a_{56,12}$					۱۰۴			
۱۳	$a_{57,13}$	$a_{58,13}$		$a_{59,13}$	$a_{61,13}$	۲۳	۶۷	۸۳	۳۹
۱۴	$a_{63,14}$					۶۰			

بالانویس ها

Γ : مسیر

y : ایستگاه

f : ثابت

مجموعه ها

p : زوجهای مبدا / مقصد

A : خط سیرها

فهرست علائم

زیر نویس ها

i : زوج تقاضا

j : خط سیر

k : گره، ایستگاه

m : پیوند

t : سرویس

<p>- متغیرهای تصمیم</p> <p>X_{ij}: حجم جریان واگن های زوج تقاضای i در خط سیر j</p> <p>α_{ij} } ۱ اگر زوج تقاضای i از خط سیر j استفاده کند ۰ در غیر اینصورت</p> <p>α_{kj} } ۱ اگر ایستگاه k ایستگاه مقصد در خط سیر j باشد ۰ در غیر اینصورت</p> <p>ω_{kj} } ۱ اگر ایستگاه k ایستگاه مبدا در خط سیر j باشد ۰ در غیر اینصورت</p> <p>γ_{mj} } ۱ اگر پیوند m در خط سیر j باشد ۰ در غیر اینصورت</p> <p>τ_{mt} } ۱ اگر پیوند m در مسیر سرویس t باشد ۰ در غیر اینصورت</p> <p>σ_{ij} } ۱ اگر سرویس t در خط سیر j باشد ۰ در غیر اینصورت</p>	<p>T: سرویسها</p> <p>D: گرهها (مقصد)</p> <p>L: پیوندها</p> <p>پارامترها</p> <p>C_j^r: هزینه سیر یک واگن در خط سیر j [واگن روز] [بلوک]</p> <p>C_k^y: هزینه عملیاتی واگن در ایستگاه k</p> <p>C_t^f: هزینه ثابت قطار برای سرویس t [ریال]</p> <p>DEM_i: تقاضای زوج مبدا/ مقصد [واگن روز]</p> <p>T_i: زمان سفر مجاز برای زوج تقاضای i [ساعت]</p> <p>Y_t: تواتر سرویس t [روز]</p> <p>TS: طول قطارمجاز [واگن]</p> <p>CAP_m: ظرفیت خط پیوند m [زوج قطار روز]</p> <p>$YCAP_k$: ظرفیت ایستگاه k [بلوک روز]</p> <p>V_m: میانگین سرعت سفر [کیلومتر ساعت]</p> <p>DIS_m: طول پیوند m [کیلومتر]</p>
---	--

مراجع

- 1 - Assad, A. A. (1980). "Models for rail transportation." *Tr. Res.*, 14A, PP. 205-220.
- 2 - Ferreira, L. (1997). "Planning australian freight operations: an overview." *Tr. Res.*, 31 A, No. 4, PP. 335-348.
- 3 - Crainic, T. G. and Roy, J. (1988). "OR tools for tactical freight transportation planning." *Eur. J. Op1. Res.*, Vol. 33, PP. 290-297.
- 4 - Assad, A. A. (1980). "Modelling rail networks- towards a routing- makeup model." *Tr. Res.*, 14B, PP.101-114.
- 5- Keaton, M. H. (1992). "Designing railroad operating plans: dual adjustment method for implementing lagrangian relaxation." *Tr Science*, Vol. 26, No. 4, PP. 263-279.
- 6 - Keaton, M. H. (1989). "Designing optimal railroad operating plans: lagrangian relaxation and heuristic approaches." *Tr. Res.*, Vol. 23B, No. 6, PP. 415-431.
- 7- Eftekhazadeh, F. (2000). *Optimization of Railway Operations Using Mathemization Models*, Ph. D. Thesis, Iran University of Science and Technology. (in Persian with English abstract).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| 1 - Model Aggregation | 2 - Train Formation |
| 3 - Tactical Planning | 4 - Car Blocking |
| 5 - Train Make-up | 6 - Train Size |
| 7 - Itinerary | 8 - Physical Route |
| 9 - Train Routing | 10 - Traffic Class |
| 11 - Service Frequency | 12 - Service Type |
| 13 - Directed Graph | 14 - Service Arc |
| 15 - Commodity | 16 - Flow Balance |
| 17 - Yard Capacity | 18 - Upper Limit |
| 19 - Primary Values | 20 - Programming Mixed-Integer |
| 21 - Overflow | 22 - Ranking of Demand |
| 23 - Oriented-Customer | 24 - Operating Policy Trade-off |

Optimization of Freight Transport by Railway Using Mathematical Models

F.Eftekharzadeh- Shahi In this study, we have proposed a mathematical Programming model for the tactical planning of freight railways, which addresses the train Formation Problem. This problem results in a multi-commodity network flow formulation that contains both integer and continuous variables. The modular structure of the statement allows consider the special conditions of the network under study and to testing various operating policies.

In this paper, the model developing process is described using a simple hypothetical network. Finally the results is represented and interpreted . Some of the model outputs are the econmic train size , high priortiy costs, and the formation plan for the freight trains.

Keywords: Freight Railways. Tactical Planning, Train Formation Problem, Multicommodity flow, Mixed Integer Programming.
