تخصیص بهینه لوکوموتیوها به قطارهای برنامه‌ریزی شده در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران

حسن حاله، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
حمیدرضا بخشی، استادیار، دانشکده‌فنی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
سید رسول حسینی (مسئول مکاتبات)، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
E-mail: rs.hoseini@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۱

چکیده

خطوط ریلی شامل ناوگانِ بزرگی از انواع گوناگون لوکوموتیوها است. یکی از اهداف بهره‌برداری راه‌آهن در شبکه ریلی، تخصیص لوکوموتیوها به قطارها است. با توجه به توسعه شبکه و از سرویس خارج شدن برخی لوکوموتیوها، بهره‌برداری بهینه از لوکوموتیوها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حال حاضر با توجه به سنتی بودن تخصیص، بهره‌برداری مناسبی از لوکوموتیوها وجود ندارد که یکی از علتهای آن تخصیص ندادن مناسب لوکوموتیوها به قطارهاست. در پژوهشهای صورت گرفته تاکنون مواردی مانند قدرتهای متفاوت هر لوکوموتیو، امکان ترکیب لوکوموتیوهای غیر همنوع و استفاده از لوکوموتیوهای مسافری و باری در نظر گرفته نشده است. بنابراین در این پژوهش، مدل ریاضی جدیدی برای تخصیص لوکوموتیوها به قطارها که با ساختار راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران(ج.ا.ا.) تناسب بیشتری دارد، ارایه می‌شود. مدل ارایه شده با استفاده از نرم‌افزار GAMS با حل کننده Cplex 7.0 حل شد و نشان می‌دهد که می‌توان با تخصیص بهینه لوکوموتیوها به قطارها با شرایط موجود تقریبا ۲۰٪ صرفه‌جویی در استفاده از لوکوموتیو ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص لوکوموتیو، مدل ریاضی، برنامه‌ریزی مختلط

۱. مقدمه

حمل‌ونقل یکی از حیاتی‌ترین خدمات در جامعه امروزی است [Liu, 2003]. حمل‌ونقل از ابتدای تاریخ بشر، نقشی اساسی در شکل‌دهی جوامع انسانی و توسعه اقتصادی آنها داشته است و در عصر حاضر نیز شریانهای ارتباطی، زیربنای اقتصاد هر کشوری را تشکیل می‌دهند [محمدزاده، ۱۳۸۹]. خطوط ریلی راه‌آهن ج.ا.ا. شامل ناوگانِ بزرگی از لوکوموتیوهایی با انواع گوناگون است. قدرت کشش لوکوموتیو، به نوع آن بستگی دارد. هر قطار، با توجه به وضعیت جغرافیایی مسیر حرکتی، برای جابجایی از مبدا به مقصد، به یک یا مجموعه‌ای از لوکوموتیوها نیازدارد. با توجه به شرایط تخصیص، حتی می‌توان برای جابجایی یک قطار از ترکیب انواع مختلف لوکوموتیوها استفاده کرد.

در شرکتهای حمل‌ونقل ریلی برای حمل‌و نقل دو رویکرد وجود دارد: اول برنامه‌ریزی[1] و دوم عملیات [Lagerholm, 2008] و [Huisman, 2005]. برخی از مسایل عمده در راه‌آهن، نیاز به برنامه‌ریزی دارد که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی[2] حرکت قطارها، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه[3]، برنامه‌ریزی تخصیص واگنهای خالی و برنامه‌ریزی تخصیص لوکوموتیوها اشاره کرد [Joborn, 2000, Liu, 2003]. در این پژوهش، فرض بر این است که تخصیص لوکوموتیوها، به قطارهایی است که زمان‌بندی آنها معلوم است. برنامه‌ریزی در دوره‌های متفاوتی صورت می‌گیرد. مساله توزیع لوکوموتیوها در راه‌آهن، به‌صورت بلندمدت و تخصیص لوکوموتیوها به قطارها، به‌صورت هفتگی(کوتاه مدت) و یا حتی کوتاه‌تر است. مساله تخصیص در محیط عملیاتی یکی از مهم‌ترین مسایل در حمل‌ونقل ریلی است. در صورتی‌که قبل از عملیات، برنامه‌ریزی صحیحی وجود نداشته باشد، در محیط عملیاتی مشکلاتی ایجاد خواهد شد. به‌عنوان مثال هنگامی که نیاز به لوکوموتیو نیست، لوکوموتیوهایی به صورت بیکار حضور داشته، و در جایی‌که بار و یا مسافر آماده جابجایی است، کمبود لوکوموتیو وجود دارد.

هدف از مساله بهینه‌سازی تخصیص لوکوموتیو، بهره‌برداری بهینه از لوکوموتیوها برای حمل بار و مسافر بیشتر در شبکه است تا بتوان با کاهش هزینه‌ها، سودآوری بیشتری ایجاد کرد [Liu, 2003]. می‌توان گفت که با تعداد لوکوموتیو کمتر، بیشترین فعالیت حمل و نقل را می توان ایجاد کرد. مساله برنامه‌ریزی تخصیص لوکوموتیوها به قطارها، برای تکمیل نیازمندی قدرت قطار برای برنامه‌ریزی حرکت قطارها است. مساله تخصیص لوکوموتیوها به قطارها عبارت است از: تعیین تعداد انواع لوکوموتیوهایی که قدرت کافی برای کشیدن قطارها با برنامه تنظیم شده را داشته باشند [Liu, 2003]. هدفِ مساله، بهینه سازی هزینه‌های ثابت و عملیاتی است. هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌هایی هستند که در صورت استفاده و یا استفاده نکردن از لوکوموتیو در نظر گرفته می‌شوند. به‌عنوان مثال اجاره لوکوموتیوها در طول دوره برنامه‌ریزی، جزو هزینه‌های ثابت محسوب می شود. هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌هایی هستند که در صورت استفاده از لوکوموتیو باید پرداخت شوند. مثالی از هزینه‌های عملیاتی، هزینه سوخت، روغن و هزینه خدمه است.

با توجه به سیاستِ دولت ج. ا. ا. برای خصوصی‌سازی[4]، طبق ماده۱ قانونِ دسترسی آزاد به شبکه حمل‌ونقل ریلی مجلس ج.ا.ا.، به منظور افزایش سهم حمل‌ونقل ریلی، از طریق جذب و گسترش سرمایه‌گذاریهای مورد نیاز و ارتقای بهره‌وری و ارایه خدمات مطلوب به مشتریان، با حفظ مالکیت دولت بر شبکه ریلی به شرکتهای حمل و نقل ریلی خصوصی، تعاونیها، شرکتها و موسسات معتبر در ارایه خدمات وابسته به آن اجازه داده می‌شود تا از شبکه حمل‌ونقل ریلی و تاسیسات و امکانات مربوطه، با رعایت قانون و مقررات و ضوابط مربوطه بهره‌برداری کنند [شدتی، ۱۳۸٦]. از سال ۱۳۸٤ راه‌آهن ج.ا.ا. شروع به واگذاری واگنها به بخش خصوصی کرده است.

طبقِ سیاستِ خصوصی‌سازی، مطالعاتی در مورد واگذاری لوکوموتیوها به بخش خصوصی آغاز شده است. بر اساس قانون دسترسی آزاد به شبکه حمل‌ونقل ریلی، تا پایان سال ۱۳۹٤ اکثر لوکوموتیوها به بخش خصوصی واگذار می‌شوند. بخش خصوصی برای توسعه حمل و نقل ریلی، باید تعدادی لوکوموتیو وارد شبکه کند. با توجه به این‌که خریداری لوکوموتیوها نیازمند پرداخت

هزینه است، تخصیص بهینه لوکوموتیوها، نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها خواهد داشت. سئوال این است که با توجه به حمل‌و نقل، در حال حاضر و آینده، چه تعداد و چه نوع لوکوموتیوهایی در شبکه مورد نیاز است؟

در ادامه این پژوهش ابتدا در بخش۲ مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تخصیص لوکوموتیوها و موضوعات مربوط انجام خواهد شد. در بخش۳ فرآیند تخصیص لوکوموتیو و مفروضات در مساله تشریح می شود. در بخش٤، مدل ریاضی پیشنهادی ارایه شده و حل یک مثال ساده ذکر می‌گردد. در بخش۵ با توجه به اطلاعات موجود در شبکه ریلی که شامل مفروضات اشاره شده صرفه‌جویی ایجاد شده برای تخصیص لوکوموتیوها در شبکه ریلی، ذکر می‌شود.

۲. بیان مفاهیم و مروری بر مطالعات انجام شده

بهتر است ابتدا برای آشنایی بیشتر، برخی مفاهیم اولیه مورد نیاز در این پژوهش از کتاب قوانین و مقررات عمومی حرکت راه‌آهن ج.ا.ا. ذکر شود [Fathollahi, 2003].

قطار: عبارت است از یک یا چند لوکوموتیو متصل به یک یا چند واگن. این نام هنگامی به آن اطلاق می‌شود که کارکنان مربوطه آنرا تحویل گرفته و به علایم[۵] و تجهیزات مربوطه طبق آیین‌نامه علامتها و مقررات مربوطه مجهز می شود.

ایستگاه: محوطه‌ای است که مجموعه‌ای از خطوط و سوزنهای[۶] به‌هم پیوسته و ساختمانهای اداری و مسکونی و سکوهای[۷] بار و مسافر در آن قرار دارند که محل توقف، تنظیم، قبول، اعزام[۸]، عملیات مانور[۹]، سبقت و تلاقی[۱۰] قطارها و سایر وسایط نقلیه راه‌آهن است.

ایستگاه تشکیلاتی: ایستگاهی است که به تناسب جمعیت و موقعیت صنعتی و اقتصادی منطقه، حتی‌الامکان در مجاورت شهرها احداث می شود، برای تنظیم و تشکیل قطارها دارای دسته مانور مستقل است و مجموعه‌ای از فعالیت‌های دپو، پست بازدید و سایر تاسیسات فنی راه‌آهن در آن انجام می‌پذیرد.

لوکوموتیو: وسیله‌ای که انرژی شیمیایی سوخت یا انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند و سبب حرکت می‌شود. سوخت لوکوموتیو می‌تواند آب، زغال سنگ، گازوییل یا جریان برق باشد.

مقررات عمومی حرکت: عبارت است از مجموعه دستورالعملهای فنی که در رابطه با وظایف مامورین و نحوه عملیات آنها در مورد سیر و حرکت قطارها و سایر وسایط نقلیه راه‌آهن تدوین شده است.

برنامه حرکت قطارها: اطلاعیه‌ای است که در آن اطلاعات مربوط به حرکت قطارها درج می‌شود. برنامه‌ای اداری است که در آن ساعات ورود و خروج، تلاقی، سبقت، فواصل ایستگاهها، سرعت و سایر مشخصاتی که برای استفاده مامورین موظف راه آهن که با حرکت قطارها تماس دارند تهیه و توزیع می‌شود.

فراز غالب: فراز مقابل شیب است و فراز غالب نشان‌دهنده حداکثر فراز در مسیر مشخص است. فراز غالب در مسیر رفت و برگشت می‌تواند متفاوت باشد [مولف]..

لوکوموتیو معادل: در راه‌آهن به ۱۸۰۰۰kg نیروی کشش مداوم یک لوکوموتیو معادل اطلاق می‌شود.

لوکوموتیو گرم(فعال)[۱۱]: لوکوموتیوی است که در قطار به‌عنوان کشنده عمل می‌کند. لوکوموتیو مذکور به صورتِ کامل یا بخشی از قدرت مورد نیاز برای کشش قطار را تامین می کند.

لوکوموتیو سرد(غیر فعال)[۱۲]: لوکوموتیوی است که فعال نبوده و به‌عنوان کشنده عمل نمی‌کند. لوکوموتیو مذکور در صورت نیاز به جابجایی به قطاری که دارای لوکوموتیو فعال است متصل شده و به‌عنوان لوکوموتیو سرد جابجا می‌شود.

در سال ۱۹۸۰ بولر[۱۳] [Booler, 1980] پیشنهاد کرد یک الگوریتم ابتکاری[۱۴] با یک تخصیص ممکن از انواع لوکوموتیوها برای قطارها شروع می‌شود. این تخصیص با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده که منجر به حل مسایل تخصیص است، به طور مکرر بهنگام سازی می شود. نسخه ناهمگن[۱۵] از مساله، ممکن است چندین لوکوموتیو از انواع متفاوت به یک قطار، به‌عنوان یک مدل جریان چندکالایی[۱۶] با محدودیت‌های اضافی فرموله شود.

در سال ۱۹۸۹، اسمیت[۱۷] و شفی[۱۸] [Smith and Shefi, 1989]

یک فرمول جریان چند کالایی غیرخطی، در گراف شبکه زمان توسعه یافته (شبکه زمان- مکان[19]) برای یک مساله زمان‌بندی لوکوموتیو، با تقاضای نامشخص ارایه کردند. در این گراف، گره‌ها[20] به ایستگاه‌های راه‌آهن با یک نقطه خاص در زمان، متناظر شده بودند. از این‌رو برای یک ایستگاه در گراف، نسخه‌های وابسته به زمانِ چندگانه وجود داشت. مولفین، افقِ برنامه‌ریزی را محدود در نظر گرفتند. عدم اطمینان، به دلیل تعداد نامعین لوکوموتیوها در قطارها است، که منجر به یک نیاز قوی و در عین حال غیرمطمئن برای کشیدن این قطارها می‌گردد. اسمیت و شِفی یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله ارایه کردند.

درسال ۱۹۹۷، زیارتی و همکاران [Ziarati, 1997] تقسیم یک مساله استراتژیک در مقیاس خیلی بزرگ را به مسایل کوچک‌تر که با هم تداخل دارند پیشنهاد کردند. این مساله در بیش از یک افق حل شد. هر مساله به نوبه خود با استفاده از روش تجزیه دانتزینگ-والف[21] حل شد که زیر مساله‌ها همانند مسایل کوتاه‌ترین مسیر به‌صورت محدود شده و یا محدود نشده که به نوع لوکوموتیو بستگی دارد، فرموله شدند. آنها یک بهبود ٦٪ در دوره‌هایی از تعداد لوکوموتیوها به دست آورده و با راه‌حل تهیه شده به‌وسیله شرکت ریلی آمریکای شمالی[22] مقایسه کردند.

در سال ۲۰۰۱، زیارتی [Ziarati, 2001] یک الگوریتم ابتکاری در دو مرحله، تعریف کرد. در گام اول یک راه‌حل دوره‌ای اولیه به‌وسیله حل پیاپی مسایل کوتاه‌ترین مسیر، در یک شبکه وزنی به دست آمد. در هر مرحله وزن کمانها[23] از یک مساله به مساله دیگر به‌وسیله در نظر گرفتن قدرت تخصیص داده شده به قطارها، تغییر یافت. مرحله دوم بهینه‌سازی مجدد با در نظر گرفتن خصوصیت چرخشی برای مساله عملکرد چرخشی پیشنهاد شد.

در سال ۲۰۰۵، اهوجا[24] و همکاران [Ahuja, 2005] یک روش ریاضی با استفاده از تجزیه مساله بر مبنای برنامه‌ریزی عدد صحیح و یک مقیاس همسایگی خیلی بزرگ، برای کمپانی راه‌آهن آمریکایی CSX، پیشنهاد کردند. زمان مورد نیاز برای حل مساله در حدود ۳۰ دقیقه بود. آنها توانستند با مدل ارایه شده از ١٦١٤ لوکوموتیو استفاده شده توسط شرکت، در حدود ٤٠٠ لوکوموتیو صرفه‌جویی نمایند. این روش در مقایسه با عملیات، که توسط شرکت استفاده می‌شده، هزینه قابل توجهی را کاهش داد.

در سال ۲۰۰۵، زیارتی و همکاران [Ziarati, 2005] یک فرمول جریان چندکالایی برای مساله چرخشی ناهمگن[25] زمان‌بندی لوکوموتیو پیشنهاد کردند. مساله به روش الگوریتم ژنتیک ابتکاری[26] حل شد. به‌عنوان مثال داده‌ها از یک شرکت واقعی متشکل از ١٦٢٩ سفر و ١١٨٢ لوکوموتیو در دسترس بوده است. آنها با یک رایانه پنتیوم۳ با سی. پی. یو ۱ گیگاهرتز، ۲۰ ساعت برای حل مساله زمان صرف کردند. تعداد لوکوموتیوهای استفاده شده از ١١٨٢ لوکوموتیو در دسترس ٧٣٨ لوکوموتیو بوده است.

۳. تشریح فرآیند تخصیص لوکوموتیو

در انجام صحیحِ یک عملیاتِ حمل‌ونقل ریلی، منابع و عواملِ مختلفی دخیل هستند که مهم‌ترین آنها عبارتنداز: واگنها، لوکوموتیوها، مامورین، ظرفیت خطوط، تجهیزات و امکانات لازم. در واقع اجرای عملیاتِ حمل‌ونقل ریلی بدون تامین هر کدام از عوامل مذکور امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر با توجه به محدودیت‌های حاکم بر هر کدام از عوامل فوق، لازم است برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده بهینه از عوامل مذکور انجام شود.

فرآیند تخصیص لوکوموتیو یا لوکوموتیوها به قطار عبارتنداز:

- آرایش قطار مورد نظر در ایستگاه تشکیلاتی بر اساس مقررات عمومی حرکت
- محاسبه تناژ مربوط به قطار(مجموع تک تک تناژ آلات ناقله که به قطار متصل اند)
- بررسی مسیر(مبدا و مقصد قطار) برای به دست آوردن فراز غالب (بیشترین فراز موجود در مسیر) با استفاده از جدول ۱-۳
- انتخاب لوکوموتیو یا لوکوموتیوهای مورد نیاز با استفاده از جدول ۱-۳ در صورت موجود بودن لوکوموتیو در ایستگاه تشکیلاتی
- تامین لوکوموتیو یا ترکیب لوکوموتیوها برای تخصیص به قطار از سایر ایستگاه‌ها (یا به صورت لوکوموتیو سرد و یا لوکوموتیو تنها به ایستگاه مورد انتقال می‌یابد) در صورتی که لوکوموتیو یا

لوکوموتیوهای مورد نیاز موجود نباشد.

– تشکیل قطار به صورت فیزیکی

– تخصیص لوکوموتیو یا لوکوموتیوهای مورد نظر

در صورتی‌که بخواهیم لوکوموتیو یا لوکوموتیوهایی را به قطاری تخصیص دهیم و لوکوموتیو مذکور در آن ایستگاه نباشد، می‌توان توسط قطاری که به آن ایستگاه در حال حرکت است لوکوموتیو یا لوکوموتیوهای مورد نظر را تامین کرد. لوکوموتیو مذکور بنا به شرایطی می‌تواند به‌صورت سرد و یا گرم جابجا شود. حال در نظر بگیرید قطاری نیاز به لوکوموتیوی دارد و هیچ قطاری در آن زمان نمی‌تواند لوکوموتیو مورد نیاز را تامین کند. در حالت ذکر شده لوکوموتیوی که قابلیت و شرایط کشش آن قطار را داراست با توجه به اعمال کمترین هزینه به‌صورت لوکوموتیو تنها و یا حمل‌ونقل سبک(فقط لوکوموتیوها جابجا می‌شوند) به ایستگاه مذکور منتقل می‌گردد. در جابجایی لوکوموتیو به‌تنهایی با توجه به این که در زمان‌بندی حرکت قطارها پیش‌بینی برای آن وجود ندارد، سرعت انتقال خیلی کم است.

در این پژوهش محدودیت‌های حاکم در راه‌آهن ج.ا.ا. در مدل ارایه شده، در نظرگرفته شده است. محدودیت‌های مذکور در مدل‌های قبل دیده نشده است. از جمله محدودیت‌های متمایز این پژوهش با سایر پژوهشها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱–برخی از انواع لوکوموتیوها امکان متصل شدن به انواع دیگر برای افزایش توان کشش(هر دو نوع فعال) را ندارند. مثال لوکوموتیوهای GM امکان اتصال به لوکوموتیوهای آلستوم را ندارند.

۲– برخی از لوکوموتیوها بنا به شرایط خاص، فقط برای کشش قطارهای مسافری، برخی دیگر برای قطارهای باری و یا هر دو بکار می‌روند.

۳– لوکوموتیوهای موجود در راه‌آهن که از یک نوع هستند متاسفانه از یک قدرت برخوردار نیستند. با توجه به شرایط تعمیراتی و بهره‌برداری دارای شرایط خاصی هستند. بنابراین در این مدل برخلاف پژوهشهای قبلی در مدل از هر لوکوموتیو به‌جای نوع لوکوموتیو استفاده شده است که باعث انحصاری بودن مدل نسبت به پژوهشهای قبلی است.

هزینه‌هایی که برای لوکوموتیو در نظر گرفته می‌شود عبارتنداز:

• هزینه‌های مربوط به مالکیت، نگهداری و تعمیرات و سوخت لوکوموتیوها

• هزینه جابجایی لوکوموتیو به‌صورت سرد

• هزینه جابجایی لوکوموتیوها به‌صورت حمل سبک

• جریمه برای لغو آرایش(عملیات مانور که موضوع پژوهش ما نیست.)

ساده‌ترین حالت از روشِ تخصیص آن است که برای تخصیص لوکوموتیوها به قطار، فقط از یک نوع لوکوموتیو استفاده شود. در این حالت کافی است برای هر قطار با توجه به مسیر و تناژ قطار، لوکوموتیو و یا لوکوموتیوهایی تخصیص داده شود. جدول ۱ فراز غالب هر مسیر را مشخص می کند. جدول مذکور بیان می‌کند که در هر مسیر، لوکوموتیو مذکور قابلیت حمل چند تن بار را دارد. به‌عنوان مثال در جدول ۱ نشان می‌دهد لوکوموتیو GT26 17 دنده در مسیر ری–گرمسار توانایی جابجایی ۲۷۰۰ تن بار را دارد. در این پژوهش نشان داده می شود با توجه به انواع مختلف لوکوموتیوها و قدرت هر کدام از آنها چگونه لوکوموتیوها به قطارها تخصیص می‌یابند تا شرایط بهتری از لحاظ حمل‌ونقل ایجاد گردد. در این پژوهش سعی خواهد شد مدلی ارایه شود که از منابع کشش موجود با شرایط بهتری استفاده شود.

مفروضات زیر در مقاله مدنظر خواهند بود:

• فراز غالب مسیرهای مختلف و توان کششی لوکوموتیوها در فرازهای مختلف در جدول ۱ معرفی شده است.

• زمان‌بندی حرکت قطارها که در این زمان‌بندی، زمان حرکت قطارها، زمان ورود و خروج از ایستگاه‌ها و زمان‌های توقف در آن مشخص شده است.

• تعداد لوکوموتیوهای موجود برای حوزه معرفی شده در تخصیص. نشان دهنده آن است که در ابتدای برنامه‌ریزی چه تعداد لوکوموتیو درهر ایستگاهی موجود است. لوکوموتیوهای اعلام شده در مدل باید بیش از نیاز در مدل باشد. در صورتی‌که تعداد کمتر باشد، مدل نشدنی خواهد بود. این اطلاعات توسط سیستم گزارش روزانه لوکوموتیوها ایجاد می‌شود.

جدول ۱. فراز غالب و میزان بار قابل حمل [مشاور مهندسین سنجش امکان طرح، ۱۳۸۸]

محور		فراز غالب در هزار	C30-7	U30-C	AD43C-2 آلستوم باری	AD43C-1 آلستوم مسافری	GT-26			G22	G12
							۱۸دنده	۱۷ دنده	۱۵ دنده		
محور تهران- مشهد	تهران-ری	۴	۶،۳۳۰	۳،۵۳۰	۷،۴۳۰	۶،۲۷۰	۳،۷۵۰	۴،۰۵۰	۴،۵۵۰	۱،۶۸۰	۱،۶۳۰
	ری-تهران	۱۰	۲،۹۰۰	۱،۶۲۰	۳،۵۲۰	۲،۹۸۰	۱،۸۵۰	۲،۰۰۰	۲،۳۵۰	۹۰۰	۷۸۰
	ری-گرمسار	۸	۹۲۰	۱،۱۲۰	۲،۷۰۰	۲،۴۰۰	۲،۲۰۰	۲،۴۰۰	۲،۷۰۰	۱،۱۲۰	۹۲۰
	گرمسار -ری	۷	۴،۰۰۰	۲،۲۳۰	۴،۷۹۰	۴،۰۵۰	۲،۵۰۰	۲،۷۰۰	۳،۰۰۰	۱،۲۶۰	۱،۰۳۰
	گرمسار-سمنان	۷	۴،۰۰۰	۲،۲۳۰	۴،۷۹۰	۴،۰۵۰	۲،۵۰۰	۲،۷۰۰	۳،۰۰۰	۱،۲۶۰	۱،۰۳۰
	سمنان-گرمسار	۶	۴،۵۶۰	۲،۵۴۰	۵،۴۴۰	۴،۶۰۰	۲،۸۰۰	۳،۰۵۰	۳،۴۰۰	۱،۴۳۰	۱،۱۸۰
	سمنان-شاهرود	۱۵	۱،۹۷۰	۱،۱۰۰	۲،۴۲۰	۲،۰۴۰	۱،۳۰۰	۱،۴۰۰	۱،۵۵۰	۶۲۰	۵۱۰
	شاهرود-سمنان	۱۵	۱،۹۷۰	۱،۱۰۰	۲،۴۲۰	۲،۰۴۰	۱،۳۰۰	۱،۴۰۰	۱،۵۵۰	۶۲۰	۵۱۰
	شاهرود-نقاب	۴	۶،۳۳۰	۳،۵۳۰	۷،۴۳۰	۶،۲۷۰	۳،۷۵۰	۴،۰۵۰	۴،۵۵۰	۱،۶۸۰	۱،۶۳۰
	نقاب-شاهرود	۸	۳،۵۵۰	۱،۹۸۰	۴،۲۸۰	۳،۶۲۰	۲،۲۰۰	۲،۴۰۰	۲،۷۰۰	۱،۱۲۰	۹۲۰
	نقاب-نیشابور	۵	۵،۳۱۰	۲،۶۹۰	۶،۲۸۰	۵،۳۱۰	۳،۲۰۰	۳،۵۰۰	۳،۹۰۰	۱،۶۷۰	۱،۳۷۰
	نیشابور-نقاب	۵	۵،۳۱۰	۲،۶۹۰	۶،۲۸۰	۵،۳۱۰	۳،۲۰۰	۳،۵۰۰	۳،۹۰۰	۱،۶۷۰	۱،۳۷۰
	نیشابور-مشهد	۸	۹۲۰	۱،۱۲۰	۲،۷۰۰	۲،۴۰۰	۲،۲۰۰	۲،۴۰۰	۲،۷۰۰	۱،۱۲۰	۹۲۰
	مشهد-نیشابور	۱۱	۲،۶۵۰	۱،۴۸۰	۳،۲۳۰	۲،۷۳۵	۱،۷۰۰	۱،۸۵۰	۲،۱۰۰	۸۳۰	۶۸۰

٤. مدل ریاضی پیشنهادی

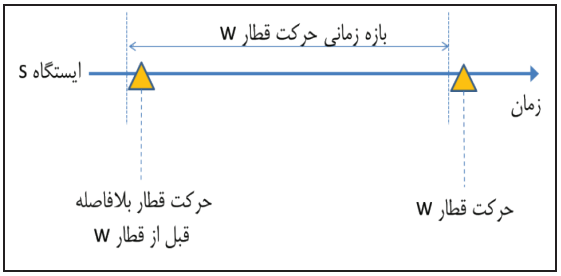
در این پژوهش مدل ریاضی جدیدی برای مساله، توسعه داده شده است. در این مدل با توجه به پیچیدگی مساله، به‌ویژه در بهنگام‌سازی موجودی لوکوموتیوها در ایستگاه‌های مختلف، با توجه به حرکت‌های مختلف لوکوموتیوها، از دیدگاهی نو در مدل‌سازی استفاده شده است. از جمله دوره‌های زمانی که در این روش به‌صورت بازه زمانی بین حرکت قطارها دیده شده است. این روش کمک می‌کند تا مدل کوچک‌تر شود و گسسته‌سازی زمانی باعث کم شدن دقت آن نشود. برای ایجاد ورودیهای این چنین دشوار، نوشتن یک برنامه محاسباتی پیچیده برای تولید برنامه زمانی بر اساس زمانهای حرکت قطار ضروری شد. در این مدل تا جایی که ممکن است اطلاعات خام توسط یک نرم‌افزار واسط برای پارامترهای ورود به مدل مهیا می‌شود. با توجه به این‌که زمان‌بندی حرکت قطارها مشخص است، نیازی برای کنترل در شرایط مدل نیست. می‌توان شرطها را در یک نرم‌افزار واسط کنترل کرد. این مدل با استفاده از نرم افزار GAMS پیاده‌سازی و با استفاده از حل کننده برنامه ریزی مختلط Cplex ۷.۰ حل شد. در ادامه ابتدا برخی تعاریف مهم در مدل ریاضی ارایه شده است. سپس به معرفی نمادهای استفاده شده در مدل پرداخته شده و در پایان مدل ریاضی به همراه توضیحات مربوط به هر یک از روابط آمده است.

٤-١ تعاریف

بازه زمانی حرکت قطار w: عبارت است از یک لحظه قبل از حرکت قطار بلافاصله قبل از قطار w تا یک لحظه قبل از حرکت قطار w. شکل ٤-١ نشان دهنده ی این بازه برای قطار w است.

تخصیص فعال لوکوموتیو به قطار: عبارت است از تخصیص یک لوکوموتیو به قطار به منظور فراهم آوردن نیروی لازم برای کشش قطار؛

تخصیص غیر فعال لوکوموتیو به قطار: عبارت است از تخصیص لوکوموتیو به قطار به صورت سرد به منظور انتقال لوکوموتیو از ایستگاه مبدا به ایستگاه مقصد؛



شکل ١. بازه زمانی حرکت قطار w

٤-٢ نمادها

s : مجموعه ایستگاه های مبدا و یا مقصد قطارها؛

i : مجموعه لوکوموتیوهای در دسترس برای سرویس دهی قطارهای برنامه ریزی شده؛

w : مجموعه قطارهای تشکیل شده در طول افق برنامه ریزی[٢٩]؛

k : انواع حالات تخصیص لوکوموتیو به قطار، شامل حالت فعال(k=١) و غیر فعال (k=٠) ؛

$x_{i,w}^{k}$: متغیری دو تایی است که مقدار آن یک است. اگر لوکوموتیو i ام به قطار w ام در حالت k ام تخصیص یافته باشد و صفر است در غیر این صورت؛

y_i : متغیری دو تایی است که مقدار آن یک است اگر لوکوموتیو i ام دست‌کم به یک قطار تخصیص یافته باشد و در غیر این صورت صفر است.

h_i : هزینه اجاره لوکوموتیو i ام در طول افق برنامه ریزی؛

$p_{i,w}$: هزینه حمل لوکوموتیو i با استفاده از قطار w؛

$\varpi_{i,w',w}$: متغیری دو تایی است که مقدار آن یک است اگر لوکوموتیو iام از ایستگاه مبدا قطار w' و در بازه حرکتی قبل از حرکت قطار w' برای تخصیص به قطار w به صورت مستقل حرکت کرده باشد؛

$C_{i,s,w}$: هزینه حرکت مستقل لوکوموتیو i ام از ایستگاه s به قصد کمک رسانی در کشش قطار w؛

$\gamma_{i,w}$: هزینه انتقال لوکوموتیو i به وسیله قطار w در حالت غیر فعال؛

$P_{i,w}$: توان گلوگاهی کششی لوکوموتیو i ام برای قطار w با توجه به بیشینه فراز حرکتی قطار w؛

ω_i : وزن لوکوموتیو i ام (تن)؛

π_w : وزن قطار w (تن)؛

$I_{i,s}^{0}$: برابر یک است اگر لوکوموتیو i در ابتدای افق برنامه ریزی در ایستگاه s قرار داشته باشد.

$I_{i,w}$: برابر یک است اگر لوکوموتیو i برای کشش قطار w در ایستگاه مبدا این قطار موجود و قابل استفاده باشد. این پارامتر نشان دهنده موجودی لوکوموتیو i ام در ایستگاه مبدا قطار w درست قبل از حرکت قطار w است.

ϕ_w : برابر یک است اگر قطار w اولین قطار برنامه ریزی شده برای حرکت از ایستگاه مبدا خود باشد.

ξ_w : ایستگاه مبدا قطار w؛

V_w: ایستگاه مقصد قطار w؛

λ_w : زمان حرکت قطار w از ایستگاه مبدا خود بر حسب میزان دقیقه ی گذشته شده از ابتدای دوره برنامه ریزی؛

u_w: زمان رسیدن قطار w به ایستگاه مقصد خود بر حسب میزان دقیقه ی گذشته شده از ابتدای دوره برنامه ریزی؛

$\theta_{w,w'}$: اطلاع (پارامتری) است که اگر قطار w اولین قطاری باشد که پس از حرکت قطار w' و از همان مبدا حرکت خود را آغاز می کند، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر را در بردارد.

L : حداکثر تعداد لوکوموتیو فعالی که برای کشش به یک قطار قابل اتصال است.

$\tau_{w',w}$: اطلاع (پارامتری) است که حاوی مقدار یک است اگر

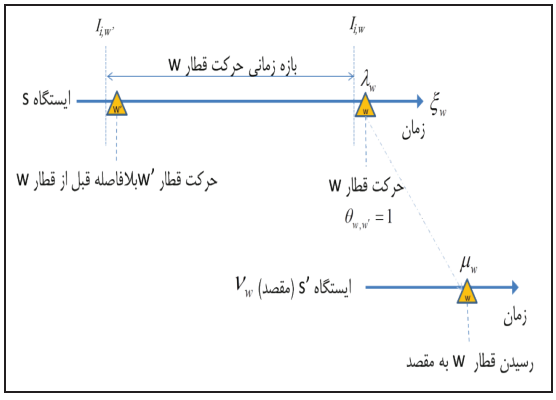
در صورت اعزام مستقل لوکوموتیوی در بازه حرکتی قطار w، به قصد استفاده در کشش قطار w، لوکوموتیوی در زمان مناسب بتواند برای کشش قطار w به ایستگاه مبدا آن رسیده باشد.

TK_w : نشان دهنده نوع قطار است. مقدار ۱ برای این پارامتر نشان دهنده این است که قطار w قطاری مسافری و مقدار ۲ برای آن نشان دهنده باری بودن آن است.

LK_i : نشان می‌دهد که لوکوموتیو i ام توان حمل چه نوع قطارهایی را دارد. مقدار یک برای این پارامتر نشان دهنده آن است که لوکوموتیو فقط توانایی حمل قطارهای مسافری را دارد. مقدار ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده آن است که که لوکوموتیو تنها توانایی حمل قطارهای باری و هر دو نوع قطارها رادارد.

$LL_{i,i'}$: اگر مقدار این پارامتر ۱ باشد، لوکوموتیو i و i' قایل اتصال به یکدیگرند، در غیر این صورت این دو لوکوموتیو نمی‌توانند به‌هم وصل شوند.

شکل (٤-٢) وضعیت برخی از نمادهای مهم را نسبت به یکدیگر نشان می دهد.



شکل۲. موقعیت نمادهای مهم نسبت به یکدیگر

٤-٣ مدل ریاضی

برای تعیین لوکوموتیوهایی که باید به هر قطار تخصیص داده شود. از مدل ریاضی به شرح زیر و با هدف کمینه سازی هزینه‌های تخصیص، استفاده شده است.

$$\text{Minimize } z=\sum_i h_i y_i+\sum_{i,s,w} c_{i,s,w}\varpi_{i,w',w} \quad (۱)$$
$$+\sum_{i,w}\gamma_{i,w}x_{i,w}^{k=0}+\sum_{i,w}\rho_{i,w}x_{i,w}^{k=1}$$

Constraints:

$$y_i \geq (\sum_w x_{i,w}^{k=0or1})M^{-1} \quad \text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad (۲)$$

$$y_i \leq \sum_w x_{i,w}^{k=0or1} \quad \text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad (۳)$$

$$\sum_i p_{i,w}x_{i,w}^{k=1} \geq \pi_w+\sum_i \omega_i x_{i,w}^{k=0} \quad \text{for w}=1,2,...,\text{m} \quad (٤)$$

$$\sum_k x_{i,w}^k+\sum_{w'}\varpi_{i,w,w'} \leq I_{i,w} \quad \text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad (٥)$$
$$\text{w}=1,2,...,\text{m}$$

$$I_{i,w}=\sum_{s=\xi_w}\phi_w I_{i,s}^0+\sum_{\substack{w'|\xi_w\neq\xi_{w'}\\ \text{and}\\ \tau_{w'w}=1}}\varpi_{i,w',w}-\sum_{\substack{w'|\xi_w\neq\xi_{w'}\\ \text{and}\\ \tau_{ww'}=1}}\varpi_{i,w,w'}+ \quad (٦)$$
$$\sum_{\substack{w'|w_{w'}=\xi_w\\ \text{and}\\ \mu_{w'}<\lambda_w\\ \text{and}\\ \mu_{w'}>\lambda_{w'}|\theta_{w,w'}=1}}\sum_k x_{i,w'}^k-\sum_{\substack{w'|\xi_{w'}=\xi_w\\ \text{and}\\ \theta_{w,w'}=1}}\sum_k x_{i,w'}^k+\sum_{w'|\theta_{w,w'}=1}I_{i,w'}$$
$$\text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad \text{w}=1,2,...,\text{m}$$

$$\sum_k x_{i,w}^k \geq \sum_{w'\neq w}\varpi_{i,w',w} \quad \text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad \text{w}=1,2,...,\text{m} \quad (۷)$$

$$\sum_i x_{i,w}^{k=1} \leq L \quad \text{w}=1,2,...,\text{m} \quad (۸)$$

$$x_{i,w}^k+x_{i',w}^k \leq 1 \text{ if } \text{LL}_{\text{i,i'}}=0, \text{ for } \text{i and} \quad (۹)$$
$$\text{i'}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad \text{k}=1$$

$$x_{i,w}^k=0; \text{ if } \text{LK}_\text{i}<3 \quad \text{and} \quad (\text{LK}_\text{i}\neq\text{TK}_\text{w}), \quad (۱۰)$$
$$\text{for i}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad \text{w}=1,2,...,\text{m}$$

$$I_{i,w}\geq 0 \text{ for } \quad \text{i}=1,2,...,\text{n} \quad \text{and} \quad \text{w}=1,2,...,\text{m} \quad (۱۱)$$

رابطه (۱) بیان کننده تابع هزینه مساله است که بایستی مقدار آن کمینه شود. این تابع برابر است با مجموع هزینه اجاره لوکوموتیوها، هزینه انتقال مستقل یک لوکوموتیو و هزینه انتقال غیر فعال لوکوموتیوها. هزینه اجاره در صورتی که لوکوموتیو حتی برای کشش یک قطار در افق برنامه ریزی مورد استفاده قرار گیرد، باید پرداخت شود.

رابطه (۲) نشان می دهد که آیا لوکوموتیو i ام مورد استفاده هیچ قطاری قرار گرفته است یا نه. در این رابطه M یک عدد به‌اندازه کافی بزرگ است. با توجه به حضور متغیر y در تابع هدف و وجود جریمه برای مقادیر غیر صفر آن حتما بایستی در قطاری

استفاده گردد.

رابطه (۳) با حذف قسمتهای بیشتری از فضای جستجو، سبب افزایش سرعت رسیدن به جواب می شود (این محدودیت در رابطه ٤-۲ برقرار است و صرفا برای کاهش فضای جواب استفاده شده است).

رابطه (٤) بیان می کند که مجموع توان کششی لوکوموتیوهای استفاده شده برای کشش هر قطار بایستی بیش از وزن آن قطار به علاوه لوکوموتیوهای غیر فعال متصل به آن باشد.

رابطه (٥) بیان می کند که لوکوموتیو i تنها در صورت وجود در ایستگاه مبدا قطار w و در زمان مورد نظر برای تعیین آرایش لوکوموتیوهای کشنده آن، می تواند به قطار w تخصیص یابد.

رابطه (٦) نشان می دهد چه لوکوموتیوهایی برای تخصیص به هر قطار، در ایستگاه مبدا آن قطار، وجود دارند.

رابطه (۷) بیان می کند که اگر لوکوموتیو به قصد استفاده در یک قطار به صورت مستقل به سمت آن اعزام شده است، حتما بایستی در ترکیب لوکوموتیوهای تخصیص داده شده به آن قطار تخصیص یابد.

رابطه (۸) مانع از تخصیص تعداد لوکوموتیوی بیش از بیشینه مجاز (بیشینه تعداد لوکوموتیوهایی که به صورت کشنده به یک قطار متصل می‌باشد) به هر قطار می‌شود.

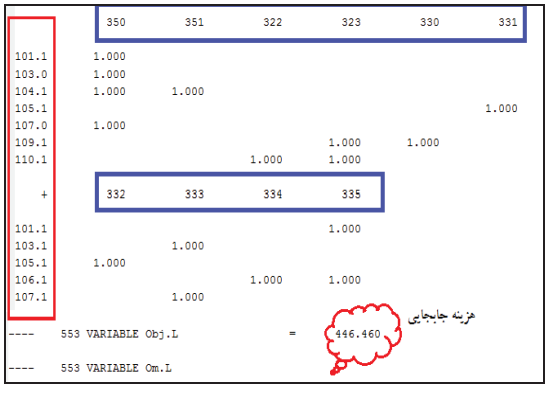
رابطه (۹) تضمین می کند دو لوکوموتیوی که به یکدیگر قابل اتصال نیستند، در حمل فعال یک قطار توامان استفاده نشوند.

رابطه (۱۰) تضمین می کند لوکوموتیوهایی که فقط می توانند قطار باری حمل کنند، برای کشش فعال قطارهای مسافری استفاده نشوند و لوکوموتیوهایی که فقط می توانند قطار مسافری را حمل کنند، برای قطارهای باری استفاده نشوند.

رابطه (۱۱) بیان کننده مثبت بودن متغیر موجودی لوکوموتیوها است.

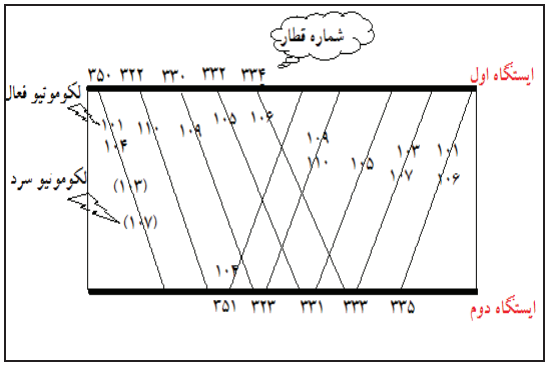
٤-٤ حل عددی

برای حل این مدل، از نرم‌افزار GAMS با حل‌کننده CPlex ۷.۰ استفاده شد. به‌عنوان نمونه مسیر انتخابی در این پژوهش تهران-مشهد انتخاب گردید. در این مثال ۸۰ لوکوموتیو معادل و ۱۸۰ قطار که ۱۳۲ قطار مسافری و ٤۸ قطار باری برنامه‌ای و ۸ ایستگاه مبدا و مقصد قطار در نظر گرفته شد. با توجه به جدول ۱ ایستگاه‌های مورد نظر تهران، ری، گرمسار، سمنان، شاهرود، نقاب، نیشاپور و مشهد در نظر گرفته شده است. در این مدل ۸٪ لوکوموتیوها به‌صورت سرد و ۲٪ لوکوموتیوها به‌صورت تنها استفاده شدند و فقط از ٦۳ لوکوموتیو معادل استفاده گردید که نشان دهنده ۲۱/۲٥٪ صرفه‌جویی در استفاده از لوکوموتیوها در مسیر تهران-مشهد است. در این مدل با توجه به متغیرهای زیاد، بهتر است برای هر محور جداگانه اجرا شود. مدلِ مذکور برای محور تهران- مشهد با رایانه Corei۷، حداقل حافظه ۱٦ گیگابایت حل گردید. مدت زمان اجرا نزدیک به ۳ ساعت بود. برای نمایش ساده، در شکل ۳ خروجی مدل که با ۱۰ قطار و ۱۰ لوکوموتیو با ۲ مبدا و مقصد است، نمایش داده شده است. شکل ۳ خروجی نرم‌افزار GAMS را نشان می دهد. لوکوموتیوها که در ستون اول از سمت راست توسط کادری عمودی نمایش داده شده‌اند، از شماره ۱۰۱ الی ۱۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. شماره قطارها در دو ردیف کادرهای افقی نمایش داده شده است. شماره‌های زوج از ایستگاه اول به ایستگاه دوم و شماره‌های فرد از ایستگاه دوم به ایستگاه اول حرکت می‌کنند. در خروجی ٤-۳ طریقه تخصیص لوکوموتیوها به قطارها نمایش داده شده است.



شکل ۳. خروجی مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS

در شکل ٤طریقه تخصیص لوکوموتیوها به قطارها نمایش داده شده است.



شکل ٤. خروجی مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس مقایسه انجام شده در تخصیص لوکوموتیوها به‌صورت سنتی(سیستم دستی) با مدل ارایه شده، می‌توان مشاهده کرد که بهبود قابل توجهی در بهره‌برداری لوکوموتیوها امکان پذیر است. آنچه که هم‌اکنون در بهره‌برداری راه‌آهن وجود دارد، کاملا سلیقه‌ای است. با توجه به واقعی شدن قیمت سوخت، به‌طور یقین مشتریان مربوط به بار و مسافر افزایش خواهند یافت. در صورتی‌که از لوکوموتیوها به‌درستی استفاده نشود، نیاز به ورود تعداد بیشتری لوکوموتیو در شبکه مشاهده خواهد شد. لوکوموتیو از جمله ناوگانی است که هزینه فوق‌العاده زیادی دارد. با توجه به پژوهشهای به عمل آمده تعداد لوکوموتیو اصلی درسرویس به‌طور میانگین در شبکه، حدود ۳۰۲ لوکوموتیو و ٤۰۰ لوکوموتیو معادل است[دفتر آمار و فناوری اطلاعات، ۱۳۸۸]. در صورتی‌که تخصیص لوکوموتیو به‌صورت علمی و طبق مدل پیشنهادی انجام شود، شاهد تقریبا ۲۰٪ بهبود در کل شبکه خواهیم بود. نتیجه این‌که با استفاده از این روش ۸۰ لوکوموتیو معادل صرفه‌جویی خواهد شد. در صورتی که هزینه تامین یک لوکوموتیو معادل حدودا ۱/۷ میلیون دلار باشد صرفه‌جویی حاصله معادل ۱۲٦ میلیون دلار است

٦. پی نوشتها

1. Planning
2. Scheduling
3. Crew Scheduling
4. Privatization
5. Signals
6. Striker
7. Stone bench
8. Dispatch
9. Consist-busting
10. Confluence
11. Active Locomotive
12. deadhead locomotive
13. Booler
14. Heuristic Algorithm
15. Heterogeneous version
16. Multi-commodity flow model
17. Smith
18. Sheffi
19. Space-time network
20. Nodes
21. Dantzig -Wolfe
22. North America
23. Arcs
24. Ahuja
25. Heterogeneous cyclic problem
26. Heuristic genetic algorithm
27. Alstom
28. Maintenance
29. Planning horizon
30. Locomotive traction power bottleneck

۷- منابع

- راه آهن جمهوری اسلامی ایران . دفتر آمار و فن‌آوری اطلاعات. (۱۳۸۹) "آمار فعالیت‌های راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران".

- راه آهن جمهوری اسلامی ایران . دفتر تشکیلات و روشها . مهندسین مشاور سنجش امکان طرح (۱۳۸۸) "مطالعات تعیین مدل مناسب تعرفه حق دسترسی به شبکه ریلی".

- شدتی، هادی (۱۳۸٦) "نگاهی به روابط بین‌الملل بین راه‌آهن ج. ا. ا. و شرکت‌های حمل‌ونقل ریلی"، نشر طاهر، چاپ اول.

- فتح‌الهی، عباس، اربابی، ابراهیم، حشمتی، محمود، بهرامی، محمود، کیانفر، یدالله و جودخواه اسدالله، (۱۳۸۳) "مقررات عمومی حرکت"، چاپ ششم.

– محمد زاده، سعید (۱۳۸۹) "مدیریت ترافیک و بهره‌برداری راه‌آهن"، مرکز نشر پژوهشکده حمل‌ونقل، ایران.

- Ahuja, R., Liu, J., Orlin, J., Sharma, D. and Shughart, L. (2005) "Solving real-life locomotive scheduling problems", Transportation Science 39, pp.503-517.

- Booler, J. M. P. (1980) "The Solution of railway locomotive scheduling problem", Journal of Operational Research Society, 31, pp.943-948.

- Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R. and Vromans, M. (2005) "Operation research in passenger railway transportation", Statistica Neerlandica, 59, pp. 467-497.

- Joborn, M., Crainic, T. G., Gendreau, M. , Holmberg, M. K. and Lundgren, J. T. (2000) "Economies of scale in empty fright car distribution in scheduled railways", Technical paper LiTH-MAT-R-2000-23, Department of Mathematics, Linkoping University, Sweden

- Lagerholm, M., Soderberg, B. and Peterson, C (2008) "Airline crew scheduling using Potts Mean Field Techniques", LU TP 97-100 February 1.

- Liu, J. (2003) "Solving REAL-LIFE transportation scheduling problems" Ph. D. Thesis, University of Florida.

- Smith, S. and Sheffi, Y. (1989) "Locomotive scheduling under uncertain demand", Transportation Research Record 1251, pp.45-53.

- Ziarati, K. (2001) "Planning solution for locomotives assignment problems", The First National Industrial Engineering Conference, Sharif University of Technology.

- Ziarati, K., Chizari, H. and Nezhad, A. (2005) "Locomotive optimization using artificial intelligence approach", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering 29, pp.93 – 10

- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Gelines, S. and Saintonge, A. (1997) "Locomotive assignment with heterogeneous consist at CN North America", European Journal of Operational Research Feature Issue of on Large Scale, High Prized Application, 97, pp.281-292.