فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۴، ص. ۴۹۹۴-۴۹۷۹

مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی ریاضی چندهدفه برنامه‌ریزی تشکیل قطار با در نظر گرفتن محدودیت انتخاب مسیر در شبکه ریلی و فروش از دست رفته

رضا علیخانی کوشکک، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

سعدالله ابراهیم نژاد، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

امین جمیلی، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۳

چکیده

مسئله برنامه ریزی تشکیل قطار یکی از مراحل برنامه ریزی حمل بار در شبکه ریلی است که نوع و تواتر حرکت قطارها جهت جابجایی بارها را تعیین می کند و طبق یک طرح بهینه، نحوه تخصیص تقاضاهای حمل ونقلی به قطارهای برنامه‌ریزی شده را مشخص می نمایدکه با محدودیت هایی اعم از تنوع و ظرفیت قطارها، ظرفیت مسیرهای ریلی، رضایت مشتریان، انتظارات صاحبان شبکه ریلی و نیز محدودیت ایستگاه های موجود در شبکه (از لحاظ ظرفیت مرتبط با عملیات مانور واگن‌ها، پذیرش و اعزام قطارها) مواجه هست. این برنامه ریزی به دنبال دستیابی به اهداف متعدد من جمله تعدیل فشار عملیاتی در ایستگاه های شبکه راه آهن، افزایش سودآوری، دستیابی به رضایت مشتریان، جریان مطلوب بار در شبکه و نیز بهره‌برداری بهینه از ظرفیت ناوگان می باشد. با توجه به بررسی حاصل از تحقیقات مرتبط با برنامه ریزی شبکه حمل ونقل ریلی و تحلیل شکاف، در این پژوهش، یک نوآوری با رویکرد توسعه مدل مبنا و مبتنی بر مسیریابی با قابلیت امکان تصمیم گیری درخصوص پذیرش یا رد خدمات حمل بار تقاضا شده ارائه گردیده است. با عنایت به مدل چندهدفه، از روش های برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک استفاده گردید و به منظور تست و حل مدل، با بکاربردن داده هایی که بصورت تصادفی شدند، از نرم افزار گمز بهره گرفته شد. جواب‌های حاصل از حل مدل و در زمان مناسب، حاکی از کارایی و صحت مدل می باشد و مبین قابلیت مدل مزبور برای پاسخگویی به شرایط واقعی شبکه حمل ونقل ریلی است.

واژه‌های کلیدی: برنامه ریزی تشکیل قطار، برنامه ریزی مسیریابی، بهینه سازی چند هدفه، برنامه ریزی آرمانی، ال پی متریک

۱. مقدمه

حمل و نقل به دلیل برخورداری از نقش مهم در بهبود وضعیت اقتصادی کشورها و تاثیرات شایان توجه بر میزان افزایش شاخص های اقتصادی مانند تولید ناخالص داخلی، از اهمیت بالایی برخوردار است، این بخش بنیادی، با سیاست و توسعه پایدار نیز گره خورده است [Berechman, 1994]. در شبکه حمل ونقل کشورها، زیرساخت های سراسری راه آهن، یک سامانه مطمئن در حمل ونقل بار و مسافر محسوب می گردد و به عنوان جایگزین مطلوبی برای سایر روش‌های حمل ونقلی، تلقی می‌شود که می تواند عامل توسعه اقتصادی پایدار باشد [Yaghini and Lesan, 2010]. ضمناً یک منبع درآمدی مناسب برای حمل ونقل بارهای داخلی و بین المللی و یک سامانه ایمن در مقایسه با حمل ونقل جاده ای محسوب می‌شود. این شیوه حمل ونقل از اثرات زیست محیطی پایین تری نسبت به سایر مدهای حمل ونقلی برخوردار است و نیز شبکه مطلوبی برای جابجایی محموله-ها، با حجم زیاد و منظم و در مسافت‌های طولانی می باشد. در دهه های اخیر با توسعه صنایع و خدمات، بر اهمیت این صنعت مهم افزوده شده است و از آنجایی که از قابلیت توانایی حمل بار در فواصل طولانی و بسیار امن برخوردار است، به طور قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های حمل و نقل، سودمند و حائز اهمیت می باشد [Yaghini, Momeni and Sarmadi, 2015]. در حال حاضر با توجه به سنتی بودن زیرساختارهای شبکه راه آهن کشور، به نحو بهینه از بستر شبکه ریلی و سایر منابع سامانه عظیم راه‌آهن، اعم از واگن‌ها، لکوموتیوها و نیروی انسانی موجود در شبکه بهره‌برداری نمی‌شود. در این راستا سه دسته محدودیت، مشتمل برمحدودیت مرتبط با ایستگاه‌های تشکیلاتی شبکه ریلی از لحاظ تعداد وظرفیت، محدودیت خطوط ریلی از لحاظ فنی و ظرفیت عبور قطارها و محدودیت منابع ریلی اعم از پرسنل، واگن‌ها و لکومتیوها، به عنوان مهمترین محدودیت ها در شبکه سراسری راه آهن مدنظر می باشند. شایان ذکر است در ایده آل ترین حالت جابجایی بار در یک شبکه حمل ونقل ریلی، آرمان هایی مانند انتقال بدون توقف واگن‌ها، حمل واگن‌های با مبدا و مقصد یکسان با یکدیگر، تشکیل قطارهای مستقیم برای گروه واگن‌های مجزا، تشکیل قطارهای متنوع و با تعداد واگن های دلخواه و اعزام قطارها بدون درنظر گرفتن محدودیت زمانی مطرح می‌باشد، اما در حالت واقعی و کاربردی، بنا به دلایل عدیده، مدیریت برنامه‌ریزی حمل بار ریلی، با تنگناها و محدودیت های فراوانی مواجه است. برخی از این محدودیت ها شامل محدودیت طول قطار، محدودیت تعداد واگن‌ها، خدمه و لکومتیوهای موجود در شبکه سراسری راه آهن، محدودیت‌های مرتبط با زمان‌بندی، قوانین حرکتی در شبکه و ظرفیت ایستگاه‌های تشکیلاتی راه آهن در خصوص قبول قطارها[۱]، تفکیک قطارها[۲]، عملیات مانوری[۳]، گروه بندی واگن ها[۴] و در نهایت تشکیل و اعزام قطارها[۵] می‌باشد. مضافاً بر اینکه چالش‌هایی مانند تاخیر در تجمع واگن‌ها، مسایل درآمدی و هزینه‌ای و موضوعات مرتبط با صرفه اقتصادی و سیاست‌های حاکمیتی و مدیریتی نیز به این موارد اضافه می شود. بنابراین تلاقی حجم بالای تقاضای حمل بار در سامانه حمل ونقل ریلی از یک طرف و مواجهه با محدودیت ها و چالش های مختلف زیرساختی و منابع حمل‌ونقلی در شبکه ریلی از طرف دیگر و نیز برخورد مستقیم این دو عامل با انتظارات صاحبان بار و متولیان ریلی منجر می‌شود تا درخصوص برنامه ریزی و تصمیم گیری در این خصوص، راه‌کارهای جدی و دقیق تری پیشنهاد شود.

بطور کلی مدیریت و برنامه ریزی حمل ونقل ریلی، از عناصر متعدد تشکیل شده است که مسئله برنامه ریزی و تشکیل قطار به عنوان یکی از ارکان مهم در این فرایند محسوب می شود. در سیستم مدیریت و برنامه ریزی حمل ونقل ریلی، مسئله تشکیل قطار مشتمل بر تخصیص واگن‌ها به قطارهای باری و تعیین مسیر قطارها می‌باشد، به نحوی که ضمن حمل کلیه واگن‌های باری، با کمترین هزینه مرتبط با عملیات‌های مانوری، کمترین تاخیرات و بهینه‌ترین زمان انتظار قطارهای باری مواجه گردد. برنامه‌ریزی تشکیل قطار(TMP)[۶] در زمره برنامه‌ریزی میان مدت راه آهن به

شمار می رود و به دلیل اهمیت زمان و کیفیت خدمت رسانی به مشتریان و کاهش هزینه تمام شده در شبکه ریلی، یافتن برنامه مناسب و بهینه تشکیل قطارها، از تصمیمات مهم در راه آهن های مترقی جهان به شمار می رود.

اصولاً شبکه حمل ونقل ریلی متشکل از خطوط ریلی و ایستگاه های تشکیلاتی[۷] (که در آن عملیات قبول قطارها، تفکیک واگن ها، تشکیل و اعزام قطارها انجام می شود) است که با مجموعه از تقاضاهای جابجایی بار مواجه می باشد، شایان ذکر است وجه تمایز تقاضاها در مبدا و مقصد آنها است و هرتقاضا با یک مبدا و مقصد معین و میزان مشخص (از لحاظ کمیت) تعیین می شود. همچنین در این شبکه، تنوع قطارها نیز از قبل تعیین می‌شوند و هر دسته از قطارها با مبداء و مقصد معین متمایز می‌شوند. در صورتیکه تا پایان مقصد قطار، هیچگونه تخلیه و بارگیری صورت نگیرد، به این قطار، قطار مستقیم اطلاق می شود و در این تحقیق از الگوی قطار مستقیم استفاده شده است. در این خصوص با توجه به بررسی مطالعات مروری مستندات مرتبط با مسئله تشکیل قطار و بررسی شکاف تحقیقاتی در تطبیق با شرایط واقعی عملیات حمل ونقل ریلی، مدل جدیدی پیشنهاد می شود که از نوع چند-هدفه می باشد.

در مدل TMP، ماموریت گروه قطارهای مختلف (با برخورداری از نقطه مبدا و مقصد ثابت) پس از رسیدن به مقصد پایان می یابد، همچنین در این مدل، جهت حرکت قطارها ثابت می باشد، اما وجود چند مسیر متفاوت در بین مبداء تا مقصد، می تواند منجر به ایجاد تفاوت در شرایط حرکت قطارها برای رسیدن به مقصد شود، لذا تلفیق مسیرهای هرچند انگشت شمار (از لحاظ تعداد) با تنوع زیاد قطارها منجر به تشکیل قطارهای متنوع با مسیرهای متعدد، به عنوان پیش‌فرض مسئله می شود که در کلان مسئله، تصمیم گیری بهینه انتخاب و تشکیل این قطارها در مسیرهای مختلف، می‌تواند به نحو جدی بر هزینه‌ها، سرعت حرکت، میزان تاخیرها و قابلیت انتقال (با توجه محدودیت های ترافیکی و تناژ بار قابل عبور در هر مسیر و ظرفیت ایستگاه های موجود در مسیرها) تاثیر گذار باشد. این مسئله (تلفیق TMP با انتخاب مسیر قطار در شبکه ریلی)، یکی از موضوعات مهمی است که از منظر اساتید علمی حوزه ریلی، مغفول واقع شده است، اما از دیدگاه خبرگان مربوطه، تاثیر این شکاف، موجب خدشه بر عملکرد مدیریت حمل ونقل ریلی بار می شود و براساس یک نظرسنجی به عمل آمده، توسعه مدل مبنا با این رویکرد می‌تواند به عنوان یک نوآوری برای حل این شکاف تلقی شود.

۲. ادبیات پژوهش

از دیدگاه عملکردی، یک شبکه راه‌آهن، از منظر شاخص‌های اقتصادی، کارایی و میزان جلب رضایت مشتری حائز اهمیت می-باشد، بنابراین دستیابی به یک برنامه اساسی جهت بهینه سازی عملیات حمل ونقل، یک نگرانی مهم برای شبکه‌های ریلی محسوب می شود. در بین مطالعات مختلف در حمل ونقل ریلی، مدارک به روز ادبیات تحقیقاتی بخش حمل ونقل، حاکی از این قضیه است که یک مسئله برنامه‌ریزی آرایش و تشکیل قطار، از اهمیت بالایی در دانشکده های حمل نقلی و محققین این بخش برخوردار است. لذا تشکیل قطار به‌عنوان یکی از مهمترین مطالعات در برنامه ریزی حمل و نقل ریلی محسوب می شود. نیوتن، بارنارت و وانس [Newton, Barnhart and Vance, 1998] مدلی جهت گروه‌بندی واگن‌های باری در محوطه های مانور در راستای کاهش هزینه مسافت پیموده شده و نیز جابجایی و تاخیر ارائه نمودند. مدل مزبور بر مبنای مسئله طراحی شبکه می‌باشد و جهت حل آن یک الگوریتم ایجاد ستون به همراه شاخه و حد با استفاده از مسئله کوتاهترین مسیر استفاده شد. اسد [Assad, 1980] شبکه راه آهن را با توجه به مسئله مسیریابی و تشکیل قطار مدل سازی نمود که در این مقاله یک دسته‌بندی سلسله مراتبی جهت مسائل برنامه‌ریزی حمل ونقل بار ارائه شد. خالد و همکاران [Khaled et al., 2015] یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی همزمان مسئله تشکیل قطار و مسیریابی قطارها ارائه نمودند که تابع هدف این مدل به صورت چندهدفه می باشد و بطورهمزمان کاهش هزینه ها، کاهش مدت زمان انتظار و حداقل

کردن مدت زمان دسته بندی واگن ها را پوشش می دهد و در پایان برای حل مدل، یک الگوریتم ابتکاری ارائه می نماید. لی و همکاران، یک مدل صفر و یک غیرخطی مسیریابی در حمل ونقل ریلی با محدودیت‌های متنوع جهت حل مدل ارائه نمودند. همچنین در این تحقیق یک الگوریتم مناسب بمنظور یافتن مسیر بهینه ارائه گردید و در پایان، مدل با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه حل شد [Li et al., 2012].

یقینی، معینی و سرمدی [Yaghini, Momeni and Sarmadi, 2013] یک الگوریتم مبتنی بر روش شاخه زدن محلی بهبود یافته جهت مسئله برنامه ریزی آرایش قطارها ارائه نمودند. در این تحقیق بمنظور مسئله آرایش قطارها که یک مدل برنامه ریزی با متغیرهای تصمیم از نوع عدد صحیح می‌باشد، روش بهبودیافته ابتکاری با رویکرد شاخه زدن محلی ارائه شد. سان، کائو و وو [Sun, Cao and Wu, 2014] یک مدل چند هدفه برای مسئله مسیریابی در راه آهن سریع السیر ارائه نمودند که در این تحقیق به صورت همزمان یک الگوریتم ژنتیک برای حل پیشنهاد گردید و درنهایت برای ارزیابی کارایی مدل موردنظر، آنالیز حساسیت انجام شد. یقینی، معینی و سرمدی، جهت مسئله آرایش قطارها، یک روش ترکیبی بر مبنای روش سیمپلکس و تبرید شبیه سازی شده ارائه نمودند [Yaghini, Momeni and Sarmadi, 2014]. بویسن ، امد و فلیندر [Boysen, Emde and Fliedner, 2016] یک مدل پایه تشکیل قطار در محوطه‌های مانور را ارائه نمودند. شایان ذکر است در محوطه‌های مانور، واگن‌های ورودی جهت تشکیل قطارهای اعزامی، تفکیک می‌شوند، از آنجاییکه این فرایند زمان بر، سیستم پیچیده‌ای از سوزن‌ها، تپه مانور و گروه بندی واگن‌های فراوان را در قالب مدل‌های تصمیم‌گیری به یکدیگر متصل می‌نماید و با توجه به اینکه، گروه بندی واگن‌های ورودی جهت تشکیل قطارهای خروجی، به عنوان یکی از مسایل مهم برنامه‌ریزی ریلی محسوب می شود، در این خصوص یک مدل پایه‌ای جهت تشکیل قطارها ارائه گردید.

یقینی، فروغی و نجاری، یک مدل ریاضی جهت مسئله گروه‌بندی واگن‌های قطار ارائه نمودند که برای حل آن از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده شد. این مسئله برای مثال های مختلف عددی حل شد و نتایج حاصل از آن با نتایج CPLEX مقایسه گردید و در نهایت برای سیستم راه آهن ایران مورد استفاده قرار گرفت [Yaghini, Foroughi and Nadjari, 2011].

بو لیانگ به مسئله تشکیل قطار با در نظر گرفتن هزینه گروه بندی مجدد پرداخت. در این تحقیق ابتدا پارامترهای گروه‌بندی مجدد تشریح گردید و یک مدل غیر خطی با متغیرهای صفر و یک ارائه شد [Bo-Liang, 1996]. افتخارزاده و شاهی (۱۳۸۱) کاربرد مدل‌های برنامه ریزی ریاضی در برنامه ریزی تاکتیکی راه‌آهن باری و چگونگی مسئله تشکیل قطارها را مورد توجه قرار دادند. این مسئله منجر به یک فرمول‌بندی جدید جریان شبکه از نوع چند محموله ای با متغیرهای عدد صحیح و پیوسته شد [Eftekharzadeh and Shahi, 2002]. هی، سانگ و چودری به طور همزمان، زمان بندی حرکت قطارها، ایجاد قطارها و مسیریابی آنها را بهینه نمودند که تابع هدف آن، بنحوی است که هزینه های ثابت قطارها و محوطه مانور و هزینه های وابسته به تقاضا و تعداد واگن ها را حداقل می کند. برای حل مدل موردنظر، از الگوریتم فوق ابتکاری جستجوی ممنوعه استفاده شد [He, Song and Chaudhry, 2003]. آنجو و بولیانگ، مدلی با تابع هدف بهینه‌سازی هزینه تشکیل قطار با فرض وجود واگن‌های خالی و پر را ارائه نمودند، خروجی این مدل، نحوه تشکیل قطار با واگن‌های پر و خالی می باشد [Anzhou and Bo-liang, 1998]. گالاردو بوبادیلا و دائوکت، در مقاله ای یک مدل جدید خطی عدد صحیح جهت برنامه‌ریزی گروه بندی واگن ها را ارائه نمودند. تابع هدف این مدل، کمینه سازی هزینه می باشد، علاوه بر مدل سازی گروه‌بندی واگن‌ها، مسیریابی حمل واگن‌ها نیز لحاظ شده است [Gallardo-Bobadilla and Doucette, 2014] و داگنازو [Daganzo, 1986] استراتژی های مختلف در راستای کمینه‌سازی عملیات مانور را مورد بررسی قرار داد و

در این تحقیق، نقش گروه بندی در کاهش عملیات مانور مطالعه شد و تاثیر طول گروه ها نیز مورد بررسی واقع گردید.

۳. تعریف مسأله

مدل TFP یک رویکرد علمی برای برنامه‌ریزی تشکیل قطارهای باری جهت نیل به دو مطلوبیت کلیدی، شامل رضایت مشتریان و تامین انتظارات متولیان راه آهن در یک دوره برنامه ریزی معین می باشد. برنامه ریزی تشکیل قطار، یک قابلیت مطلوب برای بهینه-ترین و امکان‌پذیرترین وضعیت درخصوص تخصیص واگن‌ها به قطار، تواتر جابجایی واگن ها و حجم تقاضاهای حمل شده را فراهم می نماید [Yaghini, Momeni and Sarmadi, 2014]. در چنین مسئله از شاخه طراحی شبکه خدمات، یافتن راه حل بهینه، معمولاً فعالیت دشواری تلقی می‌شود که باعث می شود تا برنامه ریزی تشکیل قطار به عنوان یک مسئله چالش برانگیز تلقی شود. در این زمینه، مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، منجر به توسعه مدل مبنای ارائه شده توسط یقینی معینی و سرمدی [Yaghini, Momeni and Sarmadi, 2015] گردیده است. مدل مبنا برای شبکه ریلی جهت جابجایی تقاضا بین یک مبداء مشخص تا یک مقصد معین (به عنوان مشخصه بارز تقاضا) و با استفاده از اطلاعات زیرساخت شبکه راه آهن استفاده می شود. شایان ذکر است، قطار در مدل مبنا از نوع مستقیم می باشد و هر گروه قطار، با مبداء و مقصد معین تعریف می شود. در این مدل، فقط یک تابع هدف وجود دارد که هزینه های حمل ونقل اعم از هزینه های ثابت و متغیر را حداقل می نماید. همچنین مهمترین محدودیت های ارائه شده در این مدل شامل موارد ذیل می باشد:

۱- محدودیت ایجاد تعادل و بالانس جریان[۸] در هر ایستگاه تشکیلاتی، به نحوی که خروج هرتقاضا از نقطه مبداء و ورود آن به نقطه مقصد را تضمین نماید و نیز منجر به خروج بارهایی شود که وارد هر ایستگاه بین راهی شدند.

۲- محدودیت حدکثر تعداد واگن هایی که به هر گروه قطار مونتاژ می شوند. (حد بالای طول قطار)

۳- محدودیت حداکثر تعداد قطارهایی که در هر ایستگاه می-توانند تشکیل شوند.

۴- محدودیت حداکثر تعداد واگن‌هایی که بمنظور عملیات تشکیل قطار در هر ایستگاه، جابجا شده و یا تغییر خط می دهند.

مدل پیشنهادی، از دو منظر، منجر به توسعه مدل مبنا می شود:

۱- در برخی از شبکه های حمل ونقل ریلی، ممکن است مسیرهای مختلفی بین مبدأ و مقصد وجود داشته باشد. یک مسئله مسیریابی[۹] عمومی در تلاش است تا یک مسیر بهینه برای ارائه یک طرح مسیریابی کارآمد را تعیین کند. لازم به ذکر است مسئله مسیریابی در مدل تشکیل قطار، در بررسی ادبیات موضوع لحاظ نشده است، در این خصوص، یک مدل چند هدفه جدید با ترکیب آرایش قطار[۱۰] و مسئله مسیریابی بصورت توام، در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به شرایط واقعی آرایش قطار، این مدل حاوی محدودیت‌های جدید است که مدل را از ادبیات تحقیق متمایز می‌نماید و منجر به نزدیک شدن مدل به برنامه های واقعی مورد استفاده در شبکه ریلی می شود. بنابراین در مدل جدید، مسئله تشکیل قطار با مسئله مسیریابی تلفیق شده است. در بعضی از شبکه های حمل ونقل ریلی، ممکن است مسیرهای متعدد از مبداء تا مقصد قطارها وجود داشته باشد. هر مسیر از شبکه، متشکل از چندین کمان[۱۱] می باشد، به نحوی که هر کمان از ظرفیت معین برای تعداد قطارهای عبوری در دوره زمانی برنامه‌ریزی برخوردار است، مضافاً براینکه یکی از مهمترین دغدغه ها در این مدل، عبور تقاضاها از میان کمان های بین مبداء تا مقصد می‌باشد، حال آنکه این کمان ها از محدودیت ظرفیت عبور قطارها برخوردار هستند. قابل توجه است که در مدل مزبور، توابع تصمیم گیری، برای مسئله مسیریابی مبتنی بر تلفیق مسئله تشکیل قطار با مسیریابی و محدودیت های مرتبط درنظر گرفته شده است. درواقع این مدل، قطارها را با درنظر گرفتن مسیرهای مربوطه جهت حمل بارهای تخصیص داده شده، تعیین می نماید. قابل ذکر است مدل پیشنهادی مشخص می کند که هرکدام از تقاضاها باید با کدام گروه از قطارها

و از کدام مسیرها عبورنماید. این نکه حائز اهمیت است که موضوع مذکور در مدل مبنا لحاظ نشده است. از آنجاییکه از یک طرف، تشکیل قطار با تعداد واگن های کم، اقتصادی نمی باشد و از طرف دیگر ظرفیت مسیرهای موجود در شبکه از لحاظ تناژ قابل عبور محدود می باشد و کمان های موجود در هریک از مسیرهای شبکه، از ظرفیت معین برای قطارهای عبوری برخوردار می باشند، لذا این مدل با ایجاد محدودیت های جدید، از مزیت کاربردی تر و واقعی تر نسبت به مدل مبنا برخوردار می‌باشد، این محدودیت ها به شرح موارد ذیل می باشند:

- حد پایین طول قطار (منظور حداقل تعداد واگن هایی که می بایست به قطار اختصاص یابد)
- حد بالای ظرفیت قطار (بر اساس تناژ)
- حد بالای ظرفیت عملیات مانوری (براساس تناژ) در محوطه های مانوری ایستگاه ها
- حد بالای تعداد قطارهای عبوری از کمان های موجود در هر مسیر

۲- در مدل پیشنهادی بر خلاف مدل مبنا، بخشی از تقاضاها بنا به دلایل صرفه اقتصادی و حداکثر نمودن درآمدها، حمل نمی‌شوند که به این پدیده، فروش ازدست رفته اطلاق می شود. این موضوع در مطالعات موردی در مسئله تشکیل قطار ارجاع داده نشد.

شایان ذکر است مدل پیشنهادی، از ۴ تابع هدف جدید برخوردار می باشد که عبارتند از:

- حداکثر نمودن سود ناشی از حمل تقاضا
- حداکثر نمودن سطح رضایت مشتریان
- حداقل نمودن تعداد عملیات مانوری در ایستگاه ها
- حداقل نمودن ظرفیت بلا[۱۲] استفاده از قطارها (بر مبنای تناژ بار قابل حمل)

۴. مدل ریاضی پیشنهادی

در این قسمت طبق مفروضات درنظر گرفته‌شده در بخش قبل، به معرفی مدل پرداخته می‌شود: نمادهای مدل ریاضی، شامل مجموعه ها و پارامترها به ترتیب در جداول (۱) و (۲) و نمادهای مربوط به متغیرهای تصمیم در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۱. مجموعه های مدل ریاضی پیشنهادی

k	نشان هر تقاضا که وابسته به مجموعه K می باشد.
t	نشان هر قطار که وابسته به مجموعه T می باشد.
s	نشان هر ایستگاه تشکیلاتی که وابسته به مجموعه S می باشد.
r	نشان هر مسیر که وابسته به مجموعه R می باشد.
i	نشان هر کمان که وابسته به مجموعه I می باشد.
K	مجموعه ای که بیانگرتقاضاهای معین در مسئله با مبداء (k) تا مقصد (k) می باشد.
T	مجموعه بیانگر قطارهای معین با مبداء (t) تا مقصد (t) که متشکل از واگن های اختصاص یافته می باشند. شایان ذکر است، قطارها به عنوان ورودی های مسئله می باشند که بر اساس سیاست های راه آهن از قبل تعیین می شوند. در این مدل، قطار مستقیم مدنظر می باشد که دارای یک مقصد و مقصد معین است، بطوریکه بین مبداء تا مقصد، هیچ گونه بارگیری انجام نمی شود. شایان ذکر است که مجموعه ای از قطارها که دارای مبداء و مقصد یکسان باشند، حتی از مسیرهای مختلف هم عبور کنند، باز هم یک گروه قطار تلقی می شوند و با یک اندیس (t) شناخته می شوند.

S	مجموعه ای که ایستگاه های تشکیلاتی را نشان می دهد. اصولاً وجه تمایز ایستگاه های تشکیلاتی از ایستگاه های عادی این است که در ایستگاه های تشکیلاتی، فعالیت های ورود قطار، تفکیک واگن ها، تغییر خطوط واگن ها، گروه‌بندی واگن ها، مونتاژ واگن ها و اختصاص واگن ها به قطار ها، تشکیل قطارها و اعزام قطار ها صورت می گیرد.
R	مجموعه ای که بیانگر مسیرهای مختلف بین مبداء تا مقصد قطارها در شبکه ریلی می باشد. هر مسیر از چند کمان تشکیل شده است.
I	مجموعه ای که نشان دهنده کمان های موجود در شبکه ریلی می باشد.

جدول ۲. پارامترهای مدل ریاضی پیشنهادی

$orig(k)$	مبدا تقاضای k
$dest(k)$	مقصد تقاضای k
d_k	تعداد هر تقاضای k (برمبنای تعداد واگن) که می بایست از مبداء(k) تا مقصد(k) جابجا شوند.
G_k	وزن هر واگن از تقاضای k
b_k	درآمد حاصل از حمل هر واگن از تقاضای k
c_t^k	هزینه حمل هر واگن از محموله k در قطار t
f_t^r	هزینه ثابت تشکیل قطار t در مسیر r
U_t^r	حد بالای تعداد واگن هایی که به قطار t در مسیر r می توان اختصاص داد.
L_t^r	حد پایین تعداد واگن هایی که به قطار t در مسیر r می توان اختصاص داد.
P_t^r	حداکثر تناژ بار قابل حمل در قطار t در مسیر r
Q_s	حداکثر وزن بار قابل حمل توسط یک عملیات مانور در محوطه s
H_s	حداکثر تعداد قطار قابل تشکیل در هر ایستگاه تشکیلاتی در هر دوره برنامه ریزی
N_s	حداکثر تعداد واگن قابل مانور در محوطه s
A_i	حداکثر تعداد قطار قابل عبور در هر کمان i در هر دوره زمانی برنامه ریزی شده
c_k	هزینه ازدست دادن هر واحد تقاضای k
a	درصد تعیین حداکثر سهم فروش از دست رفته از هر تقاضا

جدول ۳. متغیرهای تصمیم مدل ریاضی پیشنهادی

x_t^k	متغیر تصمیم عدد صحیح که مقدار تخصیص یافته از محموله k به قطار t را مشخص می کند.
y_t^r	متغیر تصمیم عدد صحیح که تعداد قطار های گروه t را در مسیر r مشخص می‌کند.
w_k	متغیر تصمیم عدد صحیح که تعداد واگن‌هایی از نوع محموله k که حمل نمی‌شوند را تعیین می‌کند (میزان فروش از دست رفته هر تقاضا).

۴-۱ اهداف مدل

مدل پیشنهادی، چندهدفه می باشد و مشتمل بر توابع هدف ذیل می باشد.

$$\text{Max } Z_1 = \sum_k b_k(d_k - w_k) - \sum_k \sum_t c_t^k x_t^k - \sum_t \sum_r f_t^r y_t^r - \sum_k c_k w_k \quad (۱)$$

$$\text{Max } Z_2 = \sum_t \sum_r y_t^r \quad (۲)$$

$$\text{Min } Z_3 = \sum_s \sum_{\substack{k \\ dest(k)\neq dest(t) \\ dest(t)=s}} \sum_t x_t^k \quad (۳)$$

$$\text{Min } Z_4 = \sum_t \sum_r P_t^r y_t^r - \sum_k \sum_t G_k x_t^k \quad (۴)$$

تابع هدف (۱) سود ناشی از حمل بار را از طریق بیشینه سازی درآمد وکمینه سازی هزینه ها مشتمل بر هزینه های ثابت و متغیر و هزینه فروش از دست رفته، بیشینه می کند. تابع هدف (۲)

سطح رضایت مشتریان را از طریق افزایش تعداد قطارهای اعزامی بیشینه می کند. لازم به توضیح است که تعداد قطارهای اعزامی می تواند منجر به کاهش معطلی و انتظار تقاضاها در صف جابجایی در ایستگاه های تشکیلاتی شود. تابع هدف (۳) تعداد عملیات مانوری در ایستگاه های تشکیلاتی را مینیمم می-نماید. به عبارت دیگر این تابع هدف منجر می‌شود تا محموله‌ها در ایستگاه های کمتری جهت عملیات مانوری متوقف شوند، لذا باعث کمیته شدن تفکیک های غیرضرور واگن‌ها و عملیات های اضافی گروه بندی، قبل از رسیدن به مقصد می شود. در واقع این رویکرد منجر به حداقل سازی حمل تقاضاها با قطارهایی می‌شود که هم مقصد نیستند. بنابراین بهترین حالت، زمانی رخ می دهد که دو پدیده واقع شود: نخست آنکه مبداء قطار و بار یکی باشد، ثانیاً مقصد قطار و بار یکی باشد. این بدان معنی است؛ برنامه آرمانی که از عملیات مانوری غیر ضرور و هزینه مرتبط اجتناب نماید، برای تقاضاها مستلزم تخصیص صرفاً یک قطار برای انتقال بار از مبداء مربوطه تا مقصد آن، بطور مستقیم و بدون توقف (جهت عملیات مانوری) می‌باشد. این موضوع مستلزم برخورداری شبکه از تنوع قطار می باشد. تابع هدف (۴) منجر به حداقل‌نمودن ظرفیت استفاده نشده از قطار از طریق مینیمم نمودن اختلاف ظرفیت موجود قطار (بر مبنای تناژ) و بار حمل شده می باشد.

۲-۴ محدودیت‌های مدل

محدودیت‌های مدل عبارتند از:

$$\sum_{orig\,(t)=i} x_t^k - \sum_{dest\,(t)=i} x_t^k = \begin{Bmatrix} d_k - w_k & orig(k)=i \\ -d_k + w_k & dest(k)=i \\ 0 & other\ wise \end{Bmatrix} \forall i \in S, k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_k x_t^k \le \sum_r U_t^r y_t^r \quad \forall t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{\substack{k \\ dest\,(k)\neq dest(t) \\ dest(t)=s}} \sum_t x_t^k \le N_s \quad \forall s \in S \quad (۸)$$

$$\sum_k x_t^k \ge \sum_r L_t^r y_t^r \quad \forall t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_k G_k x_t^k \le \sum_r P_t^r y_t^r \quad \forall t \in T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{\substack{k \\ dest\,(k)\neq dest(t) \\ dest(t)=s}} \sum_t G_k x_t^k \le N_s Q_s \quad \forall s \in S \quad (۱۱)$$

$$\sum_{\substack{r \\ i\in r}} y_t^r \le A_i \quad \forall i \in I \quad (۱۲)$$

$$w_k \le \alpha\, d_k \quad \forall k \in K \quad (۱۳)$$

$$x_t^k, y_t^r, w_k \in \text{Integer} \quad (۱۴)$$

در مدل پیشنهادی، محدودیت (۵) خروج کلیه تقاضای قابل حمل (تقاضا پس از کسر فروش از دست رفته) از مبدا، رسیدن به مقصد و عبور از ایستگاه‌های بین راهی را تضمین می‌نماید. محدودیت (۶) منجر می شود تا تعداد واگن اختصاص‌یافته به هر قطار نهایتاً برابر با حداکثر تعداد واگن ممکن و مجاز شود. محدودیت (۷) حداکثر تعداد قطار قابل تشکیل در هر محوطه را الزام می‌نماید. محدودیت (۸) حداکثر تعداد عملیات مانور در هر محوطه را تضمین می‌کند. محدودیت (۹) حداقل تعداد واگن مورد نیاز جهت تشکیل قطار را اعمال می‌نماید. زیرا تشکیل قطار با هر تعداد واگنی امکان پذیر نیست. محدودیت (۱۰) تضمین می نماید، تناژ بار اختصاص یافته به هر قطار نهایتاً برابر با حداکثر تناژ ممکن و مجاز باشد. محدودیت (۱۱) کل عملیات مانور در هر محوطه را بررسی کرده و آن را کمتر از حد بالای تناژی مانور محوطه مربوطه نگه می دارد. این حد از ضرب حداکثر تعداد عملیات مانور در میزان نهایی تناژ بار در هر عملیات مانور حاصل می‌شود. در این محدودیت، x_t^k مبین تعداد تقاضاهایی است که مقصد آن ها ایستگاه s نمی‌باشد، اما بنا به تصمیم مدل توسط قطار t به این ایستگاه آورده شده‌اند. لازم به ذکر است در محوطه های مانور علاوه بر تعداد عملیات مانور و

تعداد قطار تشکیلی، حجم عملیات مانور با توجه به تناژ مربوطه نیز یکی از عوامل محدود کننده است و لکوموتیو های مانوری معمولاً دارای تناژ مشخص حمل بار می‌باشند. محدودیت (۱۲) مجموع تعداد اعزام های عبوری از هر کمان شبکه را کمتر از ظرفیت کمان لحاظ می‌کند. محدودیت (۱۳) میزان فروش از دست رفته از هر تقاضا را محدود می‌کند و منجر می شود، درصورت حل یگانه توابع هدف بدون درنظرگرفتن سایر اهداف، تابع هدف صفر نشود. محدودیت (۱۴) تضمین می کند متغیرهای تصمیم x، y و w از نوع عدد صحیح باشد.

۵. تک هدفه نمودن مدل

با توجه به اینکه مدل پیشنهادی، از نوع چندهدفه می باشد و با عنایت به ضرورت تک هدفه نمودن مدل ها جهت حل، در این مقاله از روش‌های برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک استفاده شده است، همچنین ذکر این نکته ضروری است، در تحقیق حاضر، بین اهداف مختلف، Trade-off انجام نشده است، زیرا با توجه به اینکه مدل پیشنهادی از نوع چهار هدفه است، لذا تعداد Trade-off لازم برای تحلیل اثرات زوجی توابع هدف، بیش از حد انتظار و در نتیجه، برآیند نتایج تحلیل آنها بطور همزمان (در تحلیل مدل، بسیار پیچیده می شود)، ضمناً از آنجاییکه نرم افزار گمز نمی‌تواند مدل های چند هدفه را بطور همزمان حل نماید، بنابراین ضرورت ایجاب نمود از روش ال پی متریک و برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شود.

لازم به ذکر است، منظور از همسویی اهداف این است که در نهایت همه اهداف باعث هدایت سازمان مطبوع به سمت استراتژی‌های تعیین شده خواهند شد، ولی معنی آن این نیست که این اهداف در تعارض با یکدیگر نیستند. به عنوان مثال، تابع هدف اول در صدد حداکثر نمودن سود است، در حالی‌که تابع هداف دوم با افزایش تعداد قطارهای اعزامی، به دنبال افزایش سطح رضایت مشتریان است که مسلماً اگر تعداد قطارهای اعزامی بیش از حد زیاد شوند، باعث کاهش سود خواهد شد. به عبارت دیگر این توابع با یکدیگر در تعارض هستند، ولی هر دو همسو با استراتژی‌های سازمان می‌باشند.

از سوی دیگر، برخی از توابع هدف مورد اشاره در مدل پیشنهادی با یکدیگر در تعارض هم نیستند، ولی به دلیل اینکه واحد آنها با یکدیگر متفاوت است، نمی‌توان در ابتدا همه آنها را در یک تابع هدف جمع نمود. مثلاً تابع هدف سوم و چهارم که به ترتیب در صدد کاهش تعداد عملیات مانوری در ایستگاهها و حداقل نمودن ظرفیت خالی قطارها هستند را در نظر بگیرید. هر دوی این اهداف به نوعی باعث افزایش سود خواهند شد، ولی به دلیل اینکه محاسبه هزینه این عملیات در ایستگاهها و برای قطارهای مختلف پیچیده است، نمی‌توان به راحتی آنها را به سود یا هزینه تبدیل نمود، پس لازم است که هر کدام از آنها به صورت اهداف جداگانه در نظر گرفته شده و از روش‌های برنامه ریزی آرمانی و LP متریک استفاده نمود تا بتوان همه اهداف مختلف را در غالب یک هدف بررسی کرد و در نهایت بهترین پاسخ را که همه استراتژی‌های سازمان را در نظر بگیرد، تعیین کرد.

در این خصوص پس از حل مدل ها، به ازای تک تک هدف ها و بدون لحاظ سایر اهداف، جواب های حاصله به عنوان آرمان (سطح مطلوب) در تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی و ال پی متریک هر مدل، مورد استفاده واقع می‌شوند. شایان ذکر است تابع هدف برنامه ریزی آرمانی و ال پی‌متریک هر مدل، در صدد حداقل نمودن انحراف جواب نهایی با آرمان ها می‌باشند. ضمناً علت بکارگیری همزمان هر دو روش برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک، مقایسه جواب ها و اطمینان از حل مدل ها می‌باشد.

۵-۱ روش برنامه ریزی آرمانی[۱۳]

تابع هدف و محدودیت های مرتبط با برنامه ریزی آرمانی برای مدل عبارت است از:

$$\text{Min } Z = \theta_1 v_1^- + \theta_2 v_2^- + \theta_3 v_3^+ + \theta_4 (v_4^+ + v_4^-) \quad (۱۵)$$

s.t.

$$\sum_k b_k(d_k - w_k) - \sum_k \sum_t c_t^k x_t^k - \sum_t \sum_r f_t^r y_t^r - \sum_k c_k w_k - (v_1^+ - v_1^-) = M_1 \quad (۱۶)$$

$$\sum_t \sum_r y_t^r - (v_1^+ - v_1^-) = M_2 \quad (۱۷)$$

$$\sum_s \sum_{\substack{k \\ dest(k) \neq dest(t) \\ dest(t)=s}} \sum_t x_t^k - (v_1^+ - v_1^-) = M_3 \quad (۱۸)$$

$$\sum_t \sum_r P_t^r y_t^r - \sum_k \sum_t G_k x_t^k - (v_1^+ - v_1^-) = M_4 \quad (۱۹)$$

$$v_i^+ \times v_i^- = 0 \quad \forall i \in Z \quad (۲۰)$$

$$v_i^+, v_i^- \geq 0 \quad \forall i \in Z \quad (۲۱)$$

همانطور که در تابع هدف و محدودیت ها ملاحظه می شود، θ_i نشان دهنده ضریب اهمیت هر تابع هدف می‌باشد، v_i^+ و v_i^- بیانگر انحراف جواب توابع هدف از سطح آرمانی مطلوب می باشند که به ترتیب متغیر های انحرافی مطلوب و نامطلوب را نشان می دهند و Mi نشان‌دهنده سطح مطلوب (آرمان) مرتبط با توابع هدف است که از حل جداگانه هر تابع هدف با محدودیت های مدل بدست می آید. تابع هدف ارائه شده برای مدل، با درنظر گرفتن نوع هرتابع هدف (از لحاظ بیشینه و کمینه) و ضریب اهمیت هر تابع هدف، جمع انحراف توابع هدف از آرمان مربوطه را مینیمم می‌کند. همچنین محدودیت های پیشنهادی برای مدل ها، بجز دو محدودیت آخر، نظیر به نظیر با اهداف اصلی مدل مرتبط می باشند که برای هریک از آنها در سمت راست معادله، مقدار آرمان مربوطه نیز مشخص شده است. با توجه به دو محدودیت آخر، فقط یکی از متغیرهای مازاد v_i^+ و v_i^- که وابسته به توابع هدف می باشند، می تواند مقدار بگیرد و دیگری صفر خواهد و این مقدار حتماً مثبت است. ضمناً به ازای تک تک مدل‌های پیشنهادی، سایر محدودیت ها بدون تغییر باقی می‌مانند.

۵-۲ روش ال پی – متریک[۱۴]

تابع هدف حاصله در روش ال پی متریک (L_p metric) برای مدل عبارت است از:

$$\text{Min LP} = \left[\Delta_1 \left(\frac{Z_1^* - Z_1}{Z_1^*}\right)^p + \Delta_2 \left(\frac{Z_2^* - Z_2}{Z_2^*}\right)^p + \Delta_3 \left(\frac{Z_3 - Z_3^*}{Z_3^*}\right)^p + \Delta_4 \left(\frac{Z_4 - Z_4^*}{Z_4^*}\right)^p\right]^{\frac{1}{p}} \quad (۲۲)$$

مطابق فرمول، Δ_i نشان دهنده ضریب اهمیت هر تابع هدف بوده و Zi مبین معادله توابع هدف مدل اصلی می‌باشد. Z_i^* بیانگر مقدار جواب مطلوب (سطح بهینه موردانتظار) است که از حل جداگانه هر تابع هدف با محدودیت های مدل بدست می آید. تابع هدف Min Lp جمع انحراف ناشی از توابع هدف با سطح بهینه موردانتظار مربوطه را مینیمم می کند. این تابع هدف با توجه به p=1 محاسبه گردیده است که از نوع خطی می باشد. ضمناً محدودیت جدیدی به مدل اضافه نمی‌شود و به ازای تک تک مدل‌های پیشنهادی، سایر محدودیت ها بدون تغییر باقی می مانند.

۶. حل مدل و نتایج محاسباتی

به منظور تست مدل پیشنهادی، ۱۰ مسئله که بصورت رندمی تولید شده‌اند، بکار گرفته و توسط نرم افزار تجاری GAMS حل گردیدند. شایان ذکر است، این نرم‌افزار برای حل مسایل پیشنهادی، جواب دقیق تولید می‌نماید، در این خصوص با توجه به اینکه مدل موردنظر برای این مسایل، در زمان قابل قبول حل شده است، لذا ضرورت بهره گیری از الگوریتم های ابتکاری یا فراابتکاری برای حل مدل محرز نشد. همچنین لازم به توضیح است، با توجه به چندهدفه بودن مدل پیشنهادی، مراحل ذیل جهت حل مدل ها و دستیابی به نتایج مربوطه به عمل آمده است:

۱- تولید داده های رندمی برای اعتبارسنجی مدل ها با توجه به پارامترای معرفی شده مدل ها. لازم به توضیح است با توجه به مقدور نبودن امکان دسترسی به داده های واقعی، اطلاعات مندرج در مدل، بر اساس مشاوره خبرگان حمل ونقل ریلی و با نگاه نزدیک به واقعیت تولیده شده است، همچنین حد بالا

و پایین داده های مسئله با مقادیر داده های واقعی شبکه ریلی کشور مطابقت دارد.

۲- حل مدل پیشنهادی به ازای تک تک اهداف و بدون در نظر گرفتن سایر اهداف و داده های ورودی مسئله

۳- تبدیل مدل پیشنهادی به مدل تک هدفه، با استفاده از دو روش برنامه ریزی آرمانی و روش ال پی متریک

۴- استفاده از خروجی بند ۲ به عنوان آرمان و حل مدل تک-هدفه بر اساس برنامه ریزی آرمانی و ال پی‌متریک

۵- طبق نظرات خبرگان شبکه حمل ونقل ریلی کشور، این اهداف با یکدیگر همسو می باشند و در مجموع، بر یک هدف اصلی و کلی یعنی افزایش سود متمرکز می‌باشند، لذا وزن آنها برای اعتبارسنجی مدل، بطور یکسان و مساوی یک در نظر گرفته شد.

۶- در روش ال پی متریک، مدل پیشنهادی، با استفاده از $p=1$ حل می شود.

در ارزیابی اعتبار و حل مدل های پیشنهادی، ذکر دو نکته حائز اهمیت است:

۱- میزان هزینه فروش از دست رفته، به اندازه یک هشتم درآمد تعیین گردید.

۲- میزان فروش از دست رفته، به ۳۰ درصد تقاضا محدود گردید و a مساوی ۳۰ درصد است.

شایان ذکر است مشخصات مربوط به مسائل نمونه در جدول (۴) نمایش داده می شود. همچنین نتایج حاصل از حل مسائل نمونه در حالت تک هدفه که به عنوان ورودی برای اجرای مدل توسط روش های برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک استفاده می شود، در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصه های مربوط به مسائل نمونه

مسئله	تعداد ایستگاه ها	تعداد تقاضاها	تعداد قطارها	تعداد محدودیت ها	تعداد متغیرها
۱	۳۰	۲۵	۴۲۷	۲۲۵۱	۲۱۳۷۵
۲	۳۵	۳۰	۴۶۶	۲۶۸۸	۲۷۹۹۰
۳	۴۰	۲۵	۵۸۳	۲۹۹۹	۲۹۱۷۵
۴	۳۵	۶۰	۴۶۶	۳۷۶۳	۵۵۹۸۰
۵	۵۰	۴۵	۹۹۱	۵۴۷۸	۸۹۲۳۵
۶	۵۰	۶۰	۱۲۵۷	۴۰۷۱	۱۵۰۹۰۰
۷	۶۰	۷۰	۱۳۸۰	۸۶۶۲	۱۹۳۲۷۰
۸	۶۰	۸۰	۱۴۷۵	۹۵۵۷	۲۳۶۰۸۰
۹	۷۰	۸۵	۱۴۷۵	۱۰۷۵۴	۲۵۰۳۸۵
۱۰	۷۰	۷۵	۱۳۸۰	۹۷۵۹	۲۰۷۰۷۵

جدول ۵. نتایج پیاده سازی مسائل نمونه در حالت تک هدفه

مسئله	تابع هدف ۱		تابع هدف ۲		تابع هدف ۳		تابع هدف ۴	
	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)
۱	۳۸۸۵۹۶	۲۴/۴	۵۶۰	۱۵/۴	۰	۱/۱	۲۲۹۸۲۲	۹۳/۲
۲	۳۵۵۷۱۶	۴۱/۲	۷۲۰	۱۷/۴	۰	۱	۲۱۶۸۵۵	۱۰۱/۷
۳	۱۹۵۶۳۴	۲۹	۸۱۰	۲۶/۵	۰	۱/۲	۱۹۷۳۰۴	۱۰۹/۳

مسئله	تابع هدف ۱		تابع هدف ۲		تابع هدف ۳		تابع هدف ۴	
	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)
۴	۷۹۶۳۴۵	۸۱/۳	۷۹۵	۲۶/۳	۰	۲/۳	۴۹۳۴۴۹	۱۲۱/۴
۵	۴۲۳۲۲۵	۸۹/۳	۴۹۰	۳۳/۶	۰	۴/۲	۷۹۵۶۸۹	۱۴۳/۶
۶	۷۳۲۱۵۳	۱۰۱/۴	۵۰۲	۸۰/۷	۰	۶/۶	۱۳۶۴۲۰۱	۱۷۳/۴
۷	۴۹۹۴۲۱	۱۱۱/۷	۴۸۹	۹۵/۹	۰	۸/۷	۱۸۹۳۵۶۱	۱۸۱/۱
۸	۱۲۰۷۴۲۳	۱۱۵/۴	۹۹۵	۱۰۳	۰	۱۱/۴	۱۲۴۳۴۲۷	۱۹۴/۲
۹	۱۷۸۹۸۳۹	۱۴۰/۳	۱۰۰۲	۱۲۴/۵	۰	۱۱/۸	۱۹۵۳۳۵۹	۲۱۱/۵
۱۰	۷۴۵۳۳۲	۱۵/۸	۹۶۸	۱۴۰/۹	۰	۱۵/۷	۱۳۶۳۷۶۹	۲۳۰/۴

با در نظرگرفتن مقادیر بدست آمده در حالت تک هدفه برای مسائل مختلف، مدل های مرتبط با روش های ال پی متریک و همچنین برنامه‌ریزی آرمانی در نرم افزار گمز پیاده سازی شد و نتایج حاصل از حل مربوطه در جدول (۶) نشان داده می شود. قابل ذکر است که در روش ال پی متریک در خصوص توابعی که مقدار صفر را در حالت تک هدفه کسب نموده اند، مقدار Z^* برابر با ε=۰,۰۰۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر سمت راست محدودیت های مربوط به آرمان ها در روش برنامه ریزی آرمانی برابر با جواب حاصل از حل جداگانه توابع هدف (بدون لحاظ سایر اهداف در مدل) لحاظ شده است. همانطور که در جواب ها مشاهده می شود، مدل توسط روش ال پی متریک در زمان بسیار پایین حل شد، همچنین در زمان مطلوبی توسط روش برنامه ریزی به جواب رسیده است. شایان ذکر است علت اختلاف زمانی این دو روش به دلیل ساختار آنها در مدل سازی، از لحاظ تعداد محدودیت و نوع تابع هدف است. همچنین از آنجاییکه در روش ال پی متریک، تابع هدف، بصورت رادیکالی و براساس نسبت انحراف جواب هدف به سطح آرمانی مربوطه می باشد، جمع انحراف توابع هدف بسیار کمتر از برنامه-ریزی آرمانی هست.

در ادامه جواب نهایی تک تک اهدف که حاصل حل ال پی متریک و برنامه ریزی آرمانی است، به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه می شود. در خروجی حاصل از حل مدل ها توسط هردو روش مشاهده می شود، در ستون مربوط به تعداد عملیات های مانوری غیر ضرور، نتایج بدست آمده، صفر گردیده است. این نتیجه حاکی از عدم انتقال محموله ها با قطارهای بین راهی است و به عبارت دیگر همه محموله ها توسط قطارهای مستقیم منتقل می‌شوند. البته موضوع مزبور مبین حمل همه تقاضاها نمی باشد، چراکه در داده‌های ورودی مسایل پیشنهادی، مبداء و مقصد برخی از تقاضاها با مبداء و مقصد قطارهای تعریف شده، منطبق نیستند، پس قطعاً اگر این محموله ها منتقل می شدند، می بایست ستون مزبور، عددی غیر صفر را به خود اختصاص می داد، زیرا مشمول عملیات مانور غیرضرور برای محموله های بین راهی می شدند.

با این توضیحات ذکر این نکته حائز اهمیت است که اولاً تعداد قطارهای تعریف شده با مبادی و مقاصد مختلف، بسیار متعدد می باشد که می توانند تقاضاهای زیادی را برای حمل مستقیم پوشش دهند، ثانیاً متغیر فروش از دست رفته با در نظر گرفتن توابع هدف وسایر محدودیت ها و طبق شاخص های هزینه ای و درآمدی، منجر به حذف این محموله‌ها از برنامه حمل گردیده است و این تقاضاها به عنوان فروش از دست رفته انتخاب شدند و این تصمیم صرفاً منجر به حمل تقاضاهای با قطار مستقیم گردید.

جدول ۶. نتایج حاصل از حل مدل توسط روش های برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک (جواب تابع انحراف مدل از آرمان)

مساله	تابع هدف ال پی متریک		تابع هدف برنامه ریزی آرمانی	
	مقدار	زمان حل (ثانیه)	مقدار	زمان حل (ثانیه)
۱	۱/۹	۱/۷	۱۳۶۹۸	۱۲۱
۲	۱/۸۲	۲/۱	۱۴۸۲۳	۱۲۲
۳	۱/۸۹	۲/۴	۱۲۳۹۸	۵۰۳
۴	۱/۶	۴/۲۱	۱۰۳۶۹	۱۰۵
۵	۱/۸	۹/۳۵	۷۳۲۰	۵۰۵
۶	۱/۹۶	۱۷/۵۱	۱۲۳۳۱	۵۱۳
۷	۱/۶۴	۲۶/۶۸	۲۲۶۹۸	۵۲۵
۸	۱/۶۹	۳۳/۱۹	۲۸۷۵	۵۱۷
۹	۱/۹۹	۲۷/۱۳	۲۹۷۸	۵۳۳
۱۰	۱/۶	۲۸/۳۶	۱۳۹۸۷	۵۶۴

جدول ۷. نتایج حاصل از حل مدل توسط روش ال پی متریک (به تفکیک اهداف)

مساله	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف ۴
۱	۳۱۶۱۰۷/۸۱	۲۵۹/۰۰	۰/۰۰	۲۴۱۴۸۷/۰۰
۲	۲۷۶۳۴۵/۲۹	۴۱۴/۰۰	۰/۰۰	۳۰۱۵۴۹/۰۰
۳	۱۲۲۱۳۶/۱۰	۵۲۲/۰۰	۰/۰۰	۲۵۱۱۸۷/۰۰
۴	۶۴۵۱۱۵/۷۰	۵۵۸/۰۰	۰/۰۰	۵۶۱۷۷۳/۰۰
۵	۳۶۸۳۵۷/۱۰	۲۸۱/۰۰	۰/۰۰	۹۷۴۱۰۳/۰۰
۶	۶۴۲۰۹/۶۰	۲۹۷/۰۰	۰/۰۰	۱۵۶۳۵۵۴/۰۰
۷	۴۳۷۶۶۷/۴۹	۳۲۸/۰۰	۰/۰۰	۱۳۹۵۲۰۹/۰۰
۸	۱۲۹۴۶۱۶/۶۷	۴۶۲/۰۰	۰/۰۰	۱۵۸۶۰۱۶/۰۰
۹	۱۱۹۵۸۱۰/۱۰	۶۹۵/۰۰	۰/۰۰	۲۱۱۷۲۶۷/۰۰
۱۰	۶۸۴۶۶۱/۰۶	۷۵۸/۰۰	۰/۰۰	۱۵۱۵۷۱۷/۰۰

جدول ۸ نتایج حاصل از حل مدل توسط روش برنامه ریزی آرمانی (به تفکیک اهداف)

مساله	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف ۴
۱	۳۱۰۸۵۴/۶۸	۳۲۵/۰۰	۰/۰۰	۲۹۵۴۴۱/۰۰
۲	۲۶۹۳۲۱/۶۵	۴۰۰/۰۰	۰/۰۰	۳۱۶۲۴۳/۰۰
۳	۱۱۶۳۸۷/۱۲	۴۴۸/۰۰	۰/۰۰	۲۵۵۰۷۰/۰۰
۴	۶۳۴۲۷۰/۷۵	۵۵۸/۰۰	۰/۰۰	۶۴۲۰۷۷/۰۰
۵	۳۵۳۸۶۰/۳۲	۲۸۱/۰۰	۰/۰۰	۹۸۱۴۲۳/۰۰

مساله	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف ۴
۶	۶۱۲۴۰/۵۴	۲۹۷/۰۰	۰/۰۰	۱۵۷۳۷۰۴/۰۰
۷	۴۳۳۴۸۵/۸۸	۲۸۷/۰۰	۰/۰۰	۱۴۱۶۸۵۷/۰۰
۸	۱۲۸۳۱۳۸/۰۵	۵۵۶/۰۰	۰/۰۰	۱۷۱۸۶۰/۰۰
۹	۱۱۴۷۱۸۴/۱۶	۶۹۵/۰۰	۰/۰۰	۲۱۲۰۱۹۶/۰۰
۱۰	۶۷۵۴۴۸/۰۳	۶۰۵/۰۰	۰/۰۰	۱۵۲۷۶۶۵/۰۰

مدل پیشنهادی برای مسایل نمونه که از اندازه بسیار بالایی برخوردار هستند، توسط هر دو روش ال پی متریک و برنامه ریزی آرمانی، به ترتیب در زمان مطلوب به جواب بهینه نائل شدند. همچنین جواب حاصل ازتوابع هدف مدل در هردو روش، به یکدیگر نزدیک می باشد که موارد مزبور حاکی از کیفیت و کارایی مدل در حل مسئله تشکیل قطار و کارایی روش های بکار رفته است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مسئله تشکیل قطار (TMP) ، تواتر و تعداد قطارهای حمل بار را مشخص می کند و محموله ها را به قطارها بر اساس طرح تخصیص بهینه اختصاص می دهد. این مسئله با محدودیت های فراوانی من جمله تعداد و تنوع گروه قطارهای باری، ایستگاه های تشکیلاتی از لحاظ ظرفیت پذیرش، عملیات مانور و اعزام، ظرفیت مسیرهای حمل بار، رضایت مشتریان و نیز انتظارات صاحبان شبکه ریلی از لحاظ درآمدی و هزینه ای مواجه است. در این خصوص مسئله تشکیل قطار با برنامه‌ریزی بهینه تخصیص بار از لحاظ کمی و کیفی به قطارها و تعیین تواتر حرکت قطارها، به دنبال توزیع عادلانه فشار شبکه در ایستگاه ها، افزایش سودآوری، کاهش هزینه ها، دستیابی به رضایت مشتریان و جریان مطلوب بار در شبکه و نیز بهره برداری بهینه از ظرفیت قطارها هست.

در این مطالعه، پس از مرور تحقیقات مرتبط، نوآوری هایی استخراج گردید که منجر به بهبود مدل مبنا می شود. در این خصوص مدل نوینی با ویژگی چندهدفه بودن برای مسئله TMP پیشنهاد داده شد که با استفاده از روش های برنامه ریزی آرمانی و ال پی متریک، تک هدفه و توسط نرم افزار گمز حل گردید.

از نکات مهم در برنامه‌ریزی حمل ونقل ریلی، موضوع مسیرهای متعدد برای حرکت قطارها است. از آنجاییکه مسیرها به دلیل متفاوت بودن از جنبه فیزیکی، زیرساختی، طول مسیر، شیب مسیر، تعداد ایستگاه های تشکیلاتی موجود در مسیر، شدت تردد و ترافیک و سایر عوامل دیگر بر پارامترهایی مانند هزینه ثابت تشکیل قطار، حد بالا و پایین طول قطار، حداکثر تناژ قابل حمل توسط قطار و حداکثر تعداد قطار عبوری تاثیر می‌گذارد، بنابراین تلفیق مسئله تشکیل قطار با مسئله مسیریابی می تواند منجر به بهبود جدی مدل تشکیل قطار گردد، این مهم در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.

بعلاوه لازم به ذکر است مدل پیشنهادی، از قابلیت امکان فروش از دست رفته برخوردار می‌باشد. این ویژگی در هیچ یک از مقالات مروری مشاهده نشد، حال آنکه می بایست به شبکه ریلی اجازه داده شود تا بتواند بر اساس اهداف درآمد و هزینه‌ای و تقابل آن با سایر اهداف مسئله، درخصوص پذیرش یا رد تقاضاها در مسئله تشکیل قطار تصمیم گیری نماید. شایان ذکر است محدودیت تناژ قابل جابجایی در ایستگاه های تشکیلاتی نیز به مدل افزوده می شود. از آنجاییکه در محوطه‌های مانوری هر یک از ایستگاه های تشکیلاتی، خطوط ریلی محوطه و لکومتیوهایی که جهت تفکیک واگن ها، گروه‌بندی واگن ها و جابجایی جهت تشکیل قطارهای باری مورد استعمال قرار می‌گیرند، از قدرت و توان معینی در یک دوره برنامه ریزی برای جابجایی واگن ها برخوردار می باشند، لذا این محدودیت‌ها نیز در جهت توسعه و

واقعی تر شدن مدل مبنا حائز اهمیت است. در ادامه لازم به توضیح است محدودیت حداقل طول قطار نیز از مواردی است که در دنیای واقعی شبکه ریلی حائز اهمیت بوده و به عنوان دغدغه محسوب می شود و در صورت لحاظ شدن این محدودیت، برنامه ریزی حمل ونقل ریلی در مراحل بعد از برنامه ریزی تشکیل قطار با چالش کمتری مواجه می‌شود. شایان ذکر است اگر تعداد واگن های قطار تشکیلاتی از یک میزان کمتر باشد، از لحاظ اقتصادی برای شبکه راه آهن مطلوب نیست.

از اهداف مهم در برنامه ریزی حمل ونقل ریلی، حداقل نمودن ظرفیت بلا استفاده قطارها و نیز حداقل‌نمودن کل عملیات مانوری در شبکه است. ظرفیت بلا استفاده قطارها حاصل تفاضل جمع کل ظرفیت قطارهای تشکیلی شبکه ریلی و جمع کل واگن های جابجا شده توسط قطارهای اعزامی می‌باشد. این هدف مهم نیز به عنوان یکی از نوآوری‌های این مدل محسوب می شود. در ادامه شایان ذکر است، با توجه به هزینه‌بر بودن عملیات مانوری، تابع هدف کاهش عملیات مانوری از اهمیت بالایی در صرفه جویی زمان و هزینه برخوردار است. در خاتمه پیشنهاد می شود با توجه به اینکه فروش ازدست رفته بر اساس پارامترهای ساده در مدل لحاظ شده است، با درنظر گرفتن پارامترهای دقیق‌تر و محدودیت های بیشتر، این مدل توسعه داده شود، همچنین مدل پیشنهادی مسئله تشکیل قطار با ترکیب مسئله مسیریابی می‌تواند با لحاظ یکسری از پارامتر دیگر مانند زمان سفر در هر مسیر، زمان بندی، و یکسری از محدودیت ها اعم از ایمنی، هزینه و سود توسعه داده شود.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Train Receiving
2. Train Break-up
3. Tracks Shunting Operations
4. Car Blocking
5. Train Departure
6. Train Makeup Problem
7. Railway Network Stations
8. Establishment of Flow Balance
9. Routing Problem
10. Train Formation
11. Track/ Arc
12. Unused Capacity of the Trains
13. Goal Programming
14. L_p Metric

۹. مراجع

– افتخارزاده، ف.، شاهی، ج. (۱۳۸۱) " مدلسازی تشکیل قطارهای باری با فرمولبندی جدید "، مجله ایرانی علوم و تکنولوژی، شماره بیست و هفتم، زمستان ۱۳۸۱، صفحه. ۱۲۹–۱۳۱.

– یقینی، م.، لسان، ج. (۱۳۸۹) " برنامه ریزی عملیات حمل و نقل ریلی "، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، سال ۱۳۸۹.

– Anzhou, L. B. H. (1998) "Theory and model for combined empty and loaded car makeup decisions", Journal of the China Railway Society, 5.

– Assad, A. A. (1980) "Modelling of rail networks: toward a routing/makeup model", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 14, No. 1, pp. 101-114.

– Berechman, J. (1994) "Urban and regional economic impacts of transportation investment: a critical assessment and proposed methodology", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 28, No. 4, pp. 351-362.

– Bo-Liang, L. (1996) "Optimization of train makeup plan with nonlinear reclassifying cost", Journal of the China Railway Society, S1.

– Boysen, N., Emde, S., & Fliedner, M. (2016) "The basic train makeup problem in shunting yards", OR spectrum, Vol. 38, No. 1, pp. 207-233.

– Daganzo, C. F. (1986) "Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements", Transportation Science, Vol. 20, No. 3, pp. 189-199.

– Gallardo-Bobadilla, R., & Doucette, J. (2014) "A Linear Programming Model for Optimization of the Railway Blocking Problem".

– He, S., Song, R., & Chaudhry, S. S. (2003) "An integrated dispatching model for rail yards operations", Computers & Operations Research, Vol. 30, No. 7, pp. 939-966.

– Khaled, A. A., Jin, M., Clarke, D. B., & Hoque, M. A. (2015) "Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 14, pp. 71-84.

– Li, F., Gao, Z., Li, K., & Wang, D. Z. (2012) "Train routing model and algorithm combined with train scheduling", Journal of Transportation Engineering, Vol. 139, No. 1, pp. 81-91.

– Newton, H. N., Barnhart, C., & Vance, P. H. (1998) "Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs", Transportation Science, Vol. 32, No. 4, pp. 330-345.

– Sun, Y., Cao, C., & Wu, C. (2014) "Multi-objective optimization of train routing problem combined with train scheduling on a high-speed railway network", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 44,pp. 1-20.

– Yaghini, M., Foroughi, A., & Nadjari, B. (2011) "Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm", Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, No. 12, pp. 5579-5591.

– Yaghini, M., Momeni, M., & Sarmadi, M. (2013) "An improved local branching approach for train formation planning", Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, No. 4, pp. 2300-2307.

– Yaghini, M., Momeni, M., & Sarmadi, M. (2014) "Solving train formation problem using simulated annealing algorithm in a simplex framework", Journal of Advanced Transportation, Vol. 48, No. 5, pp. 402-416.

– Yaghini, M., Momeni, M., & Sarmadi, M. (2015) "A hybrid solution method for fuzzy train formation planning", Applied Soft Computing, Vol. 31, pp. 257-265.