# تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری در راه آهن ایران

مسعود یقینی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
فائزه غفرانی، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
ماجده اسمی زاده، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
ابراهیم میرباقری، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: yaghini@iust.ac.ir

دریافت: ۹۱/۰۵/۱۶ پذیرش:۹۱/۱۲/۱۵

## چکیده:

مسأله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی حرکت قطارهای باری، از جمله مهم‌ترین مسائل برنامه‌ریزی در راه‌آهن است که به دلیل هزینه زیاد ناشی از جابجاییهای غیرضروری لکوموتیو و هزینه‌های ناشی از تأخیر قطارهای باری، حل آن ها به‌طور همزمان و ترکیبی می‌تواند بر کاهش هزینه خدمات حمل و نقل ریلی در راه آهن ایران، تأثیر بسزایی داشته باشد. مسأله تخصیص لکوموتیو شامل تخصیص لکوموتیوها به رامهای باری است، به‌گونه‌ای که ضمن حمل کلیه رامهای باری، کمترین جابجایی غیرفعال لکوموتیو و کمترین زمان انتظار رامهای باری را ممکن سازد. در راه آهن ایران، قطارهای مسافری طبق برنامه زمانی مشخص در شبکه حرکت می‌کنند. برنامه‌ریزی زمان حرکت قطارهای باری شامل تعیین توالی و زمان حرکت قطارهای باری، در فواصل زمانی بین قطارهای مسافری است، به‌گونه‌ای که تداخلی با قطارهای مسافری نداشته باشند و کمترین تأخیر زمانی ممکن در رسیدن این قطارها به مقصد ایجاد شود. در این مقاله مسئله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی حرکت قطارهای باری برای راه آهن ایران ، در دو فاز، پیاده سازی شده است. ابتدا لوکوموتیو مورد نیاز برای حمل رامهای باری به آنها تخصیص داده می شود و سپس برنامه زمانبندی حرکت قطارهای باری تشکیل شده، تعیین می‌گردد. در فاز اول، تخصیص لوکوموتیو به رامهای موجود با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. در فاز دوم، بهترین برنامه تخصیص لوکوموتیو که در فاز یک به دست آمده، در نظر گرفته شده و یک حد پایین برای زمان رسیدن قطارهای باری به مقصدشان محاسبه می‌شود. سپس مجدداً با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک دیگر، زمانبندی قطارهای باری انجام می‌شود. برای ارزیابی روشهای بکار گرفته شده، یک مسئله ساده به صورت تفصیلی و ۳۰ مسئله با ابعاد مختلف براساس شرایط شبکه راه آهن ایران حل و جوابهای آنها ارایه شده است.

**واژه های کلیدی:** راه آهن ایران، برنامه ریزی حمل و نقل ریلی، تخصیص لکوموتیو، زمانبندی قطارهای باری، الگوریتم ژنتیک

## ۱. مقدمه

حل مسئله تخصیص لوکوموتیو در واقع پاسخ به این پرسش است که چگونه لکوموتیوهای موجود را به رامهای باری[۱] اختصاص دهیم به طوری که بیشترین میزان کارآیی لوکوموتیو حاصل شده و ضمن پوشش و حمل تمام رامهای باری موجود، جابه‌جایی‌های غیرفعال لوکوموتیوها[۲]، زمان انتظار رامهای باری برای اتصال لکوموتیو[۳] و هزینه‌های ناشی از آنها به کمترین میزان ممکن برسد. حل مسئله زمانبندی حرکت قطارهای باری پاسخگوی این پرسش است که چه زمانی و به چه ترتیبی قطارهای باریِ تشکیل شده در شبکه اعزام شوند تا اولاً تداخلی با قطارهای مسافری نداشته باشند و ثانیاً کمترین میزان تاخیر در رسیدن آنها به مقصد ایجاد شود. محدودیت تعداد لکوموتیوهای در دسترس، هزینه‌های ناشی از خریداری و افزودن لکوموتیو به شبکه، هزینه‌های ناشی از کارآیی اندک در بکارگیری لوکوموتیوها، محدودیت تعداد خطوط اختصاص یافته برای حمل بار، سرمایه‌گذاریهای عظیمی که ساخت خطوط ریلی می‌طلبد و اولویت کمتر قطارهای باری برای حرکت نسبت به قطارهای مسافری، از مواردی هستند که اهمیت مسأله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری در فواصل بین قطارهای مسافری را بیشتر نمایان می‌کنند. در نظر گرفتن این مسائل به صورت همزمان بویژه در راه‌آهنهای باری غیر برنامه‌ای مانند راه آهن ایران اهمیت بیشتری دارد. در نتیجه لازم است بخش حمل و نقل ریلی، لکوموتیوها و حرکت قطارهای باری خود را به‌گونه‌ای کارآمد مدیریت کند تا کمترین میزان هزینه و اتلاف زمان بر سیستم تحمیل شود.

حمل و نقل قطارهای باری در بسیاری از کشورها و از جمله ایران بدون برنامه بوده و حرکت آنها بر مبنای میزان تناژ بار جمع شده است. بر همین اساس، برنامه‌ریزی قطارهای باری در این قبیل شبکه‌ها در سطح عملیاتی[۴] انجام می‌شود. یعنی برنامه‌ریزی آنها در یک بازه زمانی کوتاه‌مدت و با در نظر گرفتن شرایطی که در آن بازه زمانی وجود دارد، انجام می‌شود.

در این مقاله، ابتدا مسئله تخصیص لوکوموتیو به رامهای باری با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک[۵] که یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر جمعیت[۶] است حل شده و سپس با در نظر گرفتن برنامه قطارهای مسافری، زمانبندی قطارهای باری تشکیل شده به‌صورت روزانه از طریق پیاده‌سازی یک الگوریتم ژنتیک دیگر انجام می‌شود.

سایر بخشهای مقاله به صورتی که در ادامه بیان می‌شود سازماندهی شده است. در بخش دوم مختصری از تاریخچه مطالعاتی که در زمینه تخصیص لکوموتیو، زمانبندی قطارها و مدلهای ترکیبی صورت گرفته، به‌صورت جداگانه ارایه شده است. بخش سوم به تشریح مسئله تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری و به بیان ورودیها، خروجیها و فرضیات مسئله می‌پردازد. فاز تخصیص لوکوموتیو به رامهای باری با استفاده از الگوریتم ژنتیک در بخش چهارم ارایه شده است. الگوریتم ژنتیک مورد نیاز برای زمانبندی قطارهای باری تشکیل شده در فاز دوم، در بخش پنجم تشریح شده است. در بخش ششم، الگوریتم ارایه شده بر روی یک مسئله آزمایشی با داده‌های فرضی پیاده سازی شده است. بخش هفتم شامل نتایج حاصل از پیاده‌سازی ۳۰ مسئله شبیه‌سازی شده با الگوریتم ارایه شده بوده و نتیجه‌گیری نهایی مقاله در بخش هشتم بیان شده است.

## ۲. مرور ادبیات موضوع

در طی سالهای متمادی، شرکتهای حمل و نقلی بسیاری به دنبال بهینه‌سازی و مدلسازی ریاضی مسائل مربوط به حوزه حمل و نقل ریلی، از جمله مسائل مربوط به تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارها بوده‌اند. بررسی مطالعات صورت گرفته و تاریخچه کارهای انجام شده در سه بخش تخصیص لکوموتیو، زمانبندی قطارها و مدلهای ترکیبی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱ تخصیص لوکوموتیو

بولر روشی را برای تخصیص لکوموتیو به مجموعه‌ای از قطارها جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها ارایه کرد [Booler,1980]. رایت، از یک سری الگوریتمهای تصادفی برای تخصیص لوکوموتیو به قطارهای با برنامه زمانی ثابت استفاده کرد [Wright, 1989]. فاربس و همکاران یک روش حل دقیق ارایه کردند تا به وسیله آن بتوان به قطارهایی که برنامه زمانی روزانه آنها به صورت تکرارشونده است، تخصیص لوکوموتیو داد [Forbes et al., 1991]. بولر یک روش جدید مبتنی بر آزاد سازی لاگرانژ[۷] را برای حل یک مسئله تخصیص لوکوموتیو که با برنامه‌ریزی عددصحیح مدل شده بود، ارایه کرد [Booler, 1995]. فیشتی و توس از یک روش ابتکاری[۸] برای حل مسأله برنامه ریزی تخصیص لکوموتیو به‌صورت هفتگی استفاده کردند. تعمیرات و نگهداری لکوموتیوها نیز در این مدل مد نظر قرار گرفت [Fischetti and Toth, 1997]. نئو و همکاران برای تخصیص لکوموتیو درسطح تاکتیکال یک روش حل ارایه کردند. در این مسأله، تخصیص مجموعه‌ای از لکوموتیوها با در نظرگرفتن محدودیت تعمیر و نگهداری لکوموتیوها مورد توجه قرارگرفت. از دو روش مبتنی بر شاخه و کران[۹] و تجزیه دنتزیگ- ولف[۱۰] برای حل این مسأله استفاده شده است [Nou, Desrosiers and Soumis, 1997]. زیارتی و همکاران مسئله تخصیص لوکوموتیو را به صورت یک مسئله جریانهای چند محموله‌ای برای مجموعه ای از قطارها با برنامه ثابت مدل کردند [Ziarati et al. 1997]. همچنین او و همکارانش مسئله تأمین توان مورد نیاز برای کشش قطارها را در برنامه‌های زمانی ثابت با استفاده از یک روش شاخه و برش[۱۱] معرفی کردند [Ziarati et al. 1999]. کوردئو و همکاران مسئله تخصیص همزمان لوکوموتیو و واگن به قطارهای باری را معرفی کردند و یک روش دقیق مبتنی بر تجزیه بندِرز[۱۲] برای حل مسئله پیشنهاد کردند [Cordeau, Soumis and Desrosiers, 2000]. همچنین او و همکارانش یک روش حل ابتکاری برای تخصیص لوکوموتیو و واگن به قطارهای زمانبندی‌شده را پیشنهاد کردند[Cordeau et al., 2001] . آهوجا و همکاران مسأله تخصیص لکوموتیو را با کمک برنامه ریزی عدد صحیح مختلط[۱۳] در قالب مدل جریانهای چندمحموله ای درشبکه فرموله کردند [Ahuja et al.2005] رویلن و همکاران مسئله تخصیص لوکوموتیو به قطار را به منظور تامین قدرت لازم برای کشش مجموعه‌ای از قطارهای زمانبندی‌شده مطرح کردند که این مدل ضمن کمینه کردن هزینه‌ها، دسترسی کافی به لکوموتیو و تعمیرات مورد نیاز آن را فراهم می‌کند [Rouillon, Desaulniers and Soumis, 2006]. کو و نیکلز مدلی برای یک شرکت کلمبیایی ارایه کردند. مشکل این شرکت در مورد هزینه حمل و نقل سبک بود و در مدل ارایه شده سعی شد تا با ارایه فرمولی، هزینه جابجایی های سبک به کمترین میزان خود برسد. این مدل مبتنی بر برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی بود [Kuo and Nicholls, 2007]. وایدیاناتان و همکاران با در نظر گرفتن نیازهایی که درمدل آهوجا و همکاران به آنها توجه نشده بود، مدل آنها را توسعه دادند و همچنین یک الگوریتم شاخه و کران برای حل این مسأله بکار گرفتند [Vaidyanathan et al. 2008]. قصیری و قنادپور از یک الگوریتم ژنتیک هیبرید برای حل مسئله تخصیص لکوموتیو با پنجره‌های زمانی استفاده کردند. آنها تخصیص لکوموتیو را در مجموعه‌ای از دپوهای مجزا برای مجموعه‌ای از قطارهای از پیش زمانبندی شده، انجام دادند [Ghoseiri and Ghandpour, 2010] . نوری و قنادپور به حل مسئله تخصیص لکوموتیو برای مجموعه ای از قطارهای زمانبندی شده که برای حمل توسط لکوموتیوها، اولویت بندی شده اند، پرداختند. آنها این مسئله را با استفاده از مسئله مسیریابی وسیله نقلیه[۱۴] و مسئله زمانبندی مدل کرده و برای حل آن از یک الگوریتم ژنتیک هیبرید استفاده کردند

[Noori and Ghannadpour, 2012].

## ۲-۲ زمانبندی قطارها

جوانویک و هارکر برای برنامه‌ریزی تاکتیکال ترافیک ریلی یک مدل پشتیبان تصمیم ارایه کردند. در این مدل فرض شده که همه قطارها زمان‌بندی شده و مسیر آنها ثابت است [Jovanovic and Harker, 1991]. کرای و همکاران مدلی را پیشنهاد کردند که مسئله سوخت مصرفی را در حین تأمین عملیات نگهداری، با رعایت پنجره زمانی مربوط به زمان اعزام و رسیدن قطارها در نظر می‌گرفت .[Kraay, Harker and Chen, 1991] کاری و لاک‌وود یک مدل و الگوریتم برای مسئله تعیین مسیر و زمانبندی قطارها ارایه کردند. این مدل که برای راه‌آهن‌های مسافری با ترافیک بالا طراحی شده، به‌صورت یک مدل صفر و یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کاهش هزینه کل، فرموله شده است [Carey and Lockwood, 1995]. سلیم و کای از یک الگوریتم ژنتیک برای زمانبندی قطارهای باری با درنظر گرفتن ملاحظات محیطی استفاده کردند [Salim and Cai,1997].دورفمن و مدانیک، یک مدل مجزا برای زمانبندی قطارها با ثابت در نظر گرفتن مسیر حرکت قطارها بکار گرفتند [Dorfman and Medanic, 2004]. قصیری و همکاران از یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای زمانبندی قطارهای مسافری در یک شبکه ریلی استفاده کردند [Ghoseiri, Szidarovszky and Asgharpour, 2004]. ژو و ژانگ به مطالعه مسائل زمانبندی قطارهای با سرعت بالا و متوسط پرداختند و با دو هدف کمینه کردن زمان سفر و میزان تأخیر قطارها یک مدل برای زمانبندی حرکت قطارهای سریع‌السیر پیشنهاد کردند. آنها یک روش شاخه و حد برای حل مسئله مورد نظر ارایه کردند [Zhou and Zhong, 2005]. کاپرارا و همکاران به بررسی مسئله زمانبندی در یک مسیر دوخطه پرداختند که ظرفیت ایستگاه و محدودیت‌های مربوط به زمان تعمیرات خط را نیز در نظر می‌گرفت. به این منظور یک ضریب زمانی برای متغیرهای مربوطه در نظر گرفته شد. روش حل این مسئله بر مبنای آزادسازی لاگرانژ در برخی از محدودیتها بود [Caprara et al. 2006]. ژو و ژانگ یک مدل ریاضی برای زمانبندی قطارهایی که در مسیرهای تک خطه و در دو جهت حرکت می‌کنند ارایه کردند. آنها یک روش مبنی بر شاخه و کران را برای حل مسئله بکار گرفتند[Zhou and Zhong,2007]. کچیانی و همکاران یک سری الگوریتمهای ابتکاری دقیق برای مسائل زمانبندی قطارها، مبتنی بر روش آزادسازی لاگرانژ برای قطارهای متناوب و غیرمتناوب ارایه کردند [Cacchiani et al. 2008]. دانگتو و همکاران مسئله استواری[۱۵] را درمورد زمانبندی حرکت قطارها مورد توجه قرار دادند. آنها یک تعریف جدید از پنجره‌های زمانی مربوط به استواری را ارایه کردند [D'angeto et al. 2009]. شفیعا و همکاران ایده مربوط به روش بهینه‌سازی مبتنی بر استواری را درمورد مسئله برنامه‌ریزی تولید کارگاهی[۱۶] پیاده کردند [Shafia, Jamili and PourseyedAghaee, 2010]. همچنین او و همکاران این روش را درمورد زمانبندی حرکت قطارها بکار گرفتند [Shafia et al., 2011]. شفیعا و همکاران به زمانبندی انواع مختلف قطارها در یک مسیر تک خطه پرداختند. آنها جنبه‌های استواری و تناوبی پنجره‌های زمانی را مد نظر قرار داده و محدودیت‌های مربوط به افزایش و کاهش سرعت قطارها، ظرفیت ایستگاهها و نیز هدوی را اعمال کردند. سپس از یک روش فازی برای تعدیل تاخیرقطارها، استواری برنامه‌ها و فواصل زمانی بین حرکت قطارها استفاده کردند [Shafia et al. 2012].

## ۲-۳ ترکیب تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارها

موارد معرفی شده، به حل مسئله مربوط به تخصیص لوکوموتیو و مسئله زمانبندی به صورت جداگانه پرداخته‌اند. اکثر موارد ذکر شده در زمینه تخصیص لوکوموتیو، به تخصیص لوکوموتیو برای

قطارهای با برنامه زمانبندی مشخص و با فرض ثابت بودن برنامه زمانبندی می‌پردازند و اکثر موارد ذکر شده در زمینه زمانبندی حرکت قطارها، با فرض اینکه لوکوموتیو مورد نیاز به قطار متصل است و این فرض که همواره لوکوموتیو کافی برای حمل قطارهای باری وجود دارد، به زمانبندی حرکت قطارها می‌پردازند. اما در عمل لازم است که تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری با هم ترکیب شوند تا یک برنامه موثر و کارآمد را در اختیار ما قرار دهند. به علاوه زمانبندی قطارهای باری مشخصاً در یک شبکه ریلی مسافری در موارد ذکر شده در نظر گرفته نشده است. در راه آهن ایران و بسیاری از راه آهن های دنیا، تناژ بار در دسترس، مبنای حرکت قطارهای باری قرار می‌گیرد. در واقع شرط حرکت قطار باری این است که بار به اندازه کافی برای حمل توسط این قطار جمع‌آوری شده باشد. این امر مانع از تعیین یک زمان دقیق برای اعزام قطارهای باری می‌گردد.

به علاوه تعداد قطارهای باری اعزامی در هر روز با دیگر روزها متفاوت است. همچنین در بیشتر موارد به دلیل هزینه‌های بالای ساخت خطوط جدید، لازم است که تردد قطارهای باری از همان خطوطی که برای اعزام و قبول قطارهای مسافری مورد استفاده قرار می گیرد، انجام شود. این مسائل در کنار یکدیگر منجر به غیربرنامه‌ای بودن حرکت قطارهای باری شده‌اند و لازم است که این قطارها به صورت روزانه، شیفتی و یا حتی به صورت ساعتی برنامه‌ریزی شوند. گادوین و همکاران یک روش دو مرحله‌ای برای تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی حرکت قطارهای باری با استفاده از الگوریتم ژنتیک در طول یک شبکه مسافری یک خطه پیشنهاد کردند، به نحوی که قطارهای باری در فاصله زمانی بین قطارهای مسافری در یک شبکه ریلی اعزام شوند [Godwin, Gopalan and Narendarn, 2006].

در مطالعه حاضر روش ارایه شده توسط گادوین و همکاران، برای شرایط راه آهن ایران انطباق داده شده است. مدل گادوین و همکارانش برای شرایط راه آهن کشور هند پیاده سازی شده است، اما در این مقاله، روش پیشنهادی، مطابق شرایط راه آهن ایران در نظر گرفته شده است. شبکه راه آهن کشور هند به صورت غیرستاره ای بوده و قطارها امکان انتخاب مسیرهای متفاوتی را دارند. به این علت، تعیین کوتاه ترین مسیر برای حرکت قطارها در این شبکه اهمیت بسیاری دارد. این در حالی است که شبکه راه آهن ایران ستاره ای بوده و مسیر حرکت قطارها در فواصل بین ایستگاهها ثابت و معین است. در راه آهن هند، لکوموتیوهای موجود در هر ناحیه راه آهن، از نظر حرکت در سایر نواحی دارای محدودیت هستند و از این منظر، چندین نوع لکوموتیو برای حمل بین نواحی مختلف در نظر گرفته می شوند. این در حالی است که در راه آهن ایران، لکوموتیوها محدودیتی برای حرکت بین نواحی مختلف ندارند.

## ۳. مسئله تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری

لازم است که تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری به صورت همزمان انجام شوند. این موضوع، بویژه برای راه‌آهنهای غیربرنامه‌ای مانند راه آهن ایران که به صورت روزانه برنامه‌ریزی می‌شوند، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

### ۳-۱ تخصیص لوکوموتیو

مسئله تخصیص لوکوموتیو در سطح عملیاتی شامل تخصیص یک مجموعه از لوکوموتیوها به صورت روزانه به رامهای باری موجود، با صرف کمترین هزینه ممکن است. واگنهای باری لازم است که ابتدا به یکدیگر متصل شوند تا یک رام باری تشکیل شود. سپس با اتصال یک لوکوموتیو به رام باری، یک قطار باری تشکیل می‌شود.چنان که لوکوموتیوی برای حمل یک رام باری در یک ایستگاه موجود نباشد، لازم است یک لوکوموتیو از ایستگاه دیگر آورده شود. این امر منجر به حمل لوکوموتیو به صورت غیرفعال می‌شود که یک عملیات بدون ارزش افزوده برای سیستم

تلقی می‌گردد و لازم است تا حد ممکن کاهش یابد [God-win, Gopalan and Narendarn, 2006]. مدت زمانی که لکوموتیو به صورت غیرفعال حمل می‌شود زمان غیرفعالنام دارد[۱۷]. تعداد لوکوموتیوها و مکان آنها و در واقع میزان دسترسی به لوکوموتیوها تأثیر مستقیمی بر زمان انتظار رامهای باری برای اتصال لوکوموتیو دارد. افزایش این زمان انتظار به عنوان یک هزینه برای سیستم محسوب می‌شود. ورودیهای مسئله در فاز تخصیص لکوموتیو، شامل یک شبکه از گرهها به‌صورت $G=(V,E)$ است که $V$ نشان‌دهنده تعداد گرهها و $E$ نشان‌دهنده تعداد آرکها است. گرهها در مسئله نشان‌دهنده ایستگاهها بوده و آرکها به عنوان بلاکها در نظر گرفته می‌شوند. این شبکه در تمام مدت حل مسئله ثابت است. همچنین اطلاعات مربوط به مدت زمان سیر قطارهای باری بین ایستگاهها، تعداد و شماره لکوموتیوها، موقعیت لکوموتیوها در ایستگاهها، تعداد، شماره، مبدا، مقصد و زمان آماده‌سازی رامهای باری ذکر شده است و به عنوان ورودی این فاز در نظر گرفته می‌شود. به علاوه فرض می‌شود که تمام لکوموتیوها از یک نوع هستند و می‌توانند برای کل مسیر مورد استفاده قرار بگیرند. تبادل لکوموتیوها بین ایستگاهها بلامانع است. تخصیص لوکوموتیو صورت گرفته در این فاز، با هدف کاهش زمان غیرفعال لوکوموتیو و زمان انتظار رامهای باری انجام می‌شود. خروجی فاز تخصیص لکوموتیو، شامل تعیین چگونگی حمل رامهای باری به وسیله لکوموتیوهای موجود است. اگر قرار باشد یک لوکوموتیو بیش از یک رام باری را حمل کند، ترتیب حمل رامها نیز تعیین می‌شود. در این فاز از یک الگوریتم ژنتیک برای تعیین بهترین برنامه تخصیص لوکوموتیو استفاده می‌شود. این الگوریتم در بخش روش حل پیشنهادی تشریح می شود.

### ۳-۲ زمانبندی قطارهای باری

بعد از تخصیص لوکوموتیو به رامهای باری، لازم است که قطارهای باری تشکیل شده برای حرکت در یک شبکه مسافری زمانبندی و برنامه‌ریزی شوند. ابتدا لازم است که مفاهیم مربوط به پنجره زمانی قطارهای باری و مسافری معرفی شوند. پنجره زمانی قطارهای مسافری مدت زمانی است که یک بلاک به وسیله یک قطار مسافری اشغال می‌شود. پنجره زمانی قطار باری نیز مدت زمانی است که در آن یک قطار باری اجازه اشغال بلاک را دارد. در فاز زمانبندی قطارها، پنجره زمانی حرکت قطارهای مسافری شامل زمان حرکت قطار از مبدا و زمان رسیدن آن به مقصد، پنجره زمانی حرکت قطارهای باری و نیز خروجی به دست آمده از تخصیص لکوموتیو در فاز اول، به عنوان ورودی در نظرگرفته می‌شود. برای راه‌حل منتخب به دست آمده از فاز اول، یک حد پایین برای زمان رسیدن قطارهای باری به مقصدشان محاسبه می‌شود. زمانبندی انجام شده در این فاز با هدف کاهش میزان تأخیرات و عدم تداخل با قطارهای مسافری صورت می‌گیرد. خروجی زمانبندی قطارهای باری در یک شبکه مسافری شامل تعیین توالی حرکت قطارهای باری و نیز تعیین زمان اعزام قطارها از مبدا و زمان رسیدن آن به مقصد است. در این مقاله تعیین راه‌حل زمانبندی قطارهای باری در شبکه ریلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد.

## ٤. روش حل مسئله تخصیص لکوموتیو به رامهای باری

همان طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، به منظور حل مسئله در فاز یک و تخصیص لکوموتیو به رامهای باری، الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم روش مناسبی برای مسائل چند هدفه[۱۸] است. اجزای اصلی در به کارگیری این الگوریتم شامل نمایش کروموزومها[۱۹]، جمعیت اولیه[۲۰]، مقیاس ارزیابی کروموزومها[۲۱]، ترکیب[۲۲]، جهش[۲۳] و استراتژی انتخاب[۲٤] است. به علاوه پارامترهایی از قبیل اندازه جمعیت[۲۵]، احتمال ترکیب و احتمال جهش بایستی تعیین شوند. الگوریتم استفاده شده در این

بخش بر اساس الگوریتم ارایه شده توسط گادوین و همکاران [Godwin, Gopalan and Narendarn, 2006] برای شرایط راه آهن ایران توسعه داده شده است.

### ٤-١ نمایش جوابها

طول کروموزومها را در الگوریتم ژنتیک، تعداد رامهای باری در نظرگرفته و مکان هر ژن در کروموزوم، بیانگر شماره رام باری است. محتوای هر ژن نیز شماره لوکوموتیو تخصیص داده شده به آن رام است. برای مثال اگر ۳ لکوموتیو و ٦ رام باری موجود باشد، نمایش کروموزوم آن به صورت شکل ۱، بیان کننده این است که لکوموتیو ۱ به رامهای باری ۱، ۳، ٤، لکوموتیو ۲ به رامهای باری ۵ و ٦ و لکوموتیو ۳ به رام باری ۲ تخصیص داده شده است.

### ٤-٢ تعیین ترتیب حمل رامها به وسیله لوکوموتیوها

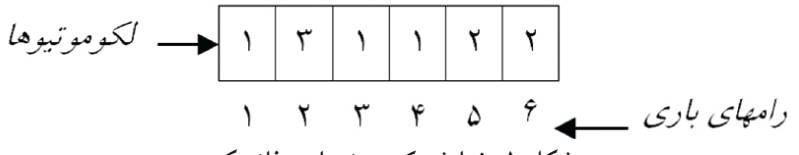
چنان که یک لوکوموتیو بیش از یک رام باری را در دوره برنامه‌ریزی حمل کند، لازم است که توالی حمل رامها توسط لوکوموتیو مربوط تعیین شود. این مسئله دو پارامتر مدت زمان غیر فعال لوکوموتیوها و زمان انتظار رامهای باری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل دو روش برای تعیین توالی حمل رامها مورد استفاده قرار گرفته و احتمال بکارگیری هریک از این روشها تعیین می‌شود. روش اول به دنبال کمینه کردن زمان غیر فعال لوکوموتیوها و روش دوم به دنبال کاهش مدت زمان انتظار رامهای باری است. بر اساس روش مبتنی بر کاهش زمان غیر فعال لوکوموتیوها، چنان که مکان یک لوکوموتیو و رامهایی که به آن تخصیص داده شده‌اند مشخص باشد، اولین رام باری که حمل خواهد شد، رامی است که نزدیک ترین فاصله را با لوکوموتیو مربوط به آن دارد. بعد از رسیدن رام مذکور به مقصد، از میان رامهای باقی مانده، لوکوموتیو نزدیک‌ترین رام را حمل خواهد کرد و این عمل تا زمانی که کلیه رامها برنامه ریزی و حمل شوند ادامه می یابد. بر اساس روش مبتنی بر کاهش زمان انتظار رام های باری، چنانچه رامهای تخصیص داده شده به یک لکوموتیو تعیین شده باشد، ترتیب حمل رامها توسط لوکوموتیو حامل آنها، بر مبنای زمان آماده شدن رامها خواهد بود. به این معنا که رامی که زودتر از سایر رامها آماده شود، ارجحیت بیشتری برای حمل توسط لوکوموتیو خواهد داشت.

### ٤-٣ جمعیت اولیه

به منظور حصول اطمینان از اعتبار و فراگیری و تنوع اعضای جمعیت، اندازه جمعیت ۳ برابر طول کروموزوم در نظر گرفته می‌شود، به عنوان مثال، اندازه جمعیت برای شکل ۱ برابر ۱۸ کروموزوم است. با تولید تصادفی کروموزوم‌ها به اندازه ذکر شده، جمعیت اولیه با توجه به تعداد لوکوموتیوها و رامهای در دسترس، حاصل می شود.

### ٤-٤ ارزیابی توابع هدف برای تخصیص رامها به لوکوموتیوها

هدف این مرحله تعیین میزان برازندگی[۲٦] راه‌حلهای کاندید در یک جمعیت باتوجه به اهداف تعیین شده است. اهداف اولیه در نظر گرفته شده شامل کمینه کردن مجموع زمانهای غیرفعال لوکوموتیوها و کمینه کردن مجموع زمان انتظار رامهای باری است. به علاوه دو هدف ثانویه شامل کمینه‌سازی بیشینه زمان انتظار رامها و بهینه سازی بهره وری لوکوموتیوها[۲۷] نیز در نظر گرفته شده و کروموزومها در مورد میزان برآورده ساختن این چهار هدف، مورد ارزیابی قرار می گیرند. در توابع هدف پارامترهای




**شکل ۱. نمایش کروموزمها در فاز یک**

شمارنده لکوموتیو (L) و شمارنده رام باری (R) استفاده شده است.

هدفهای اولیه

(۱) زمان غیرفعال لکوموتیو $l$ $= \sum_{l=1}^{L}$ کل زمان غیرفعال لکوموتیوها

(۲) زمان انتظار رام باری $= \sum_{r=1}^{R}$ کل زمان انتظار رامها

هدفهای ثانویه

(۳) {زمان انتظار رام باری Max{r}= بیشترین زمان انتظار رامها

(٤) بهره‌وری لکوموتیوها = مدت زمان سفر قطارهای باری / (زمان لکوموتیوهای غیرفعال + مدت زمان سفر قطارهای باری)

به منظور ارزیابی هر کدام از راه‌حلهای کاندید (کروموزومهای جمعیت) موارد زیر بایستی انجام شود:

الف- با استفاده از یکی از روشهای مبتنی بر زمان غیرفعال لوکوموتیو یا مبتنی بر زمان انتظار رام باری، ترتیب حمل رامها، برای لوکوموتیوهایی که قرار است بیش از یک رام حمل کنند، تعیین شود.

ب- مقادیر مربوط به مجموع زمان غیرفعال لوکوموتیو، مجموع زمان انتظار رامهای باری، بیشینه مدت زمان انتظار رامهای باری و بهره‌وری لوکوموتیو برای هر کروموزوم محاسبه شود.

سپس با توجه به مقادیر محاسبه شده، $F_1$ و $F_2$ به ترتیب زیر محاسبه می شود:

(۵) $F1 = \frac{\text{کمترین مجموع زمان غیرفعال لکوموتیوها تا جمعیت فعلی}}{\text{مجموع زمان غیرفعال لکوموتیوها در کروموزوم فعلی}}$

(٦) $F2 = \frac{\text{کمترین مجموع زمان انتظار رامهای باری تا جمعیت فعلی}}{\text{مجموع زمان انتظار رامهای باری در کروموزوم فعلی}}$

سپس میزان برازندگی هر کروموزوم به ترتیب زیر محاسبه می شود:

(۷) $F = C \times (w \times F_1 + (1-w) \times F_2)$

$0 < w < 1$

در صورتی که $F_1$ و $F_2$ کمتر از $0.5$ باشند یا بیشینه زمان انتظار بزرگتر از ۳۰۰ دقیقه باشد، $C$ مقدار $1$ و در غیر این صورت مقدار $0.5$ را می‌گیرد. $w$ هم بصورت یک عدد تصادفی از میان اعداد صفر تا یک انتخاب می‌شود.

## ٤-٥- انتخاب کروموزوم ها برای تولید مثل

انتخاب کروموزومهای والد بر مبنای میزان برازندگی آنها انجام می‌شود. بر اساس روش گلدبرگ[Goldberg, ۱۹۸۹] احتمال انتخاب هر کروموزوم به عنوان کروموزوم والد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۸) $$P_{select_i} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} f_i}$$

در رابطه فوق $f_i$ میزان برازندگی کروموزوم i در جمعیت فعلی و $N_{pop}$ اندازه جمعیت فعلی است.

## ٤-٦ بازترکیب و جهش

عملگر بازترکیب، راه حلهای بالقوه ای را با ترکیب دو کروموزوم والد ایجاد می کند. به این ترتیب که هر کروموزوم فرزند[۲۸] بخشی از ویژگیهای کروموزومهای والد را حفظ می‌کند. از جمعیت والد یک جفت کروموزوم برای عمل بازترکیب انتخاب شده و عمل بازترکیب با احتمال ۰/۸ صورت گرفته و بخشی از ژنهای این کروموزومها برای تولید کروموزومهای جدید با هم مبادله می‌شوند.

برای حصول اطمینان از جستجوی نقاط جدید در فضای جواب، عمل جهش نیز با احتمال ۰/۲ انجام می‌گیرد. در واقع هدف عملگر جهش این است که فضاهای جوابی را که قبلا شناسایی نشده اند جستجو و شناسایی کند. عمل جهش از طریق مبادله تصادفی ژنهای انتخاب شده در کروموزومها صورت می‌گیرد.

## ٤-٧- انتخاب کروموزومها برای نسل بعدی

بعد از اجرای عملگرهای الگوریتم ژنتیک، کروموزومهای فرزند با توجه به اولویتهای تابع هدف و میزان برازندگی‌شان اولویت

بندی می‌شوند. قدم بعدی انتخاب نسل جدید کروموزومها از میان جمعیت کروموزومهای والد و جمعیت کروموزومهای فرزند است. برای انتخاب نسل جدید از میان دو جمعیت موجود، استراتژیهای متفاوتی وجود دارد. هدف این استراتژیها، تولید نسلهایی از کروموزومهاست که در مجموع، نسل پیشین را بهبود بخشد. بر اساس استراتژی بکاررفته در این پژوهش، بهترین $(N_{pop}/3)$ کروموزوم از میان جمعیت کروموزومهای والد و بهترین $(2\times N_{pop}/3)$ کروموزوم از میان جمعیت کروموزومهای فرزند انتخاب شده تا نسل جدید با اندازه $N_{pop}$ تولید شود.

### ٤-٨ شرط خاتمه

الگوریتم ژنتیک اطلاعات تولید شده در حین حل مسئله را با توجه به میزان برازندگی کروموزومها کسب می‌کند و کروموزومهایی را تولید می‌کند که تخصیص لوکوموتیو بهتری را برای رامهای باری ارایه می کند. بعد از تولید تعداد کافی جمعیتهای کروموزومها، ممکن است بهبود چشمگیری در وضعیت کروموزومها صورت نگیرد. اگر تا ۲۰ نسل متوالی بهبودی رخ ندهد، الگوریتم ژنتیک خاتمه پیدا می‌کند.

### ٤-٩ رده بندی راه حلهای تخصیص لکوموتیو

الگوریتم ژنتیک مجموعه ای از راه حلها را برای تخصیص لوکوموتیو در اختیار قرار می‌دهد. بهتر است یک تصمیم گیرنده از میان این راه حلها یک راه حل منتخب را برگزیند تا به عنوان ورودی برای زمانبندی مورد استفاده قرار گیرد. پیش از محاسبه وزن هر راه حل لازم است که ارزش هر راه حل بین ۰ تا ۱ مقیاس دهی شود. نحوه فرآیند مقیاس دهی در ادامه تشریح می‌شود.

پارامترها و متغیرهای لازم برای فرایند مقیاس دهی کروموزومها:

$j$ : اندیس مربوط به شماره راه‌حل

$k$ : اندیس مربوط به شماره تابع هدف

$S_j^k$: ارزش هدف $k$ ام در راه حل $j$ ام

$P^i$: میزان اولویت تابع هدف $k$ (توسط شخص تصمیم گیرنده تعیین می‌شود)

$W_j$: وزن راه‌حل j

ابتدا توابعی که هدف آنها ماکزیمم کردن مجموعه‌ای از متغیرهاست از توابعی که به‌دنبال کمینه کردن متغیرها هستند جدا می‌شوند و برای هر دسته مقدار $S_j^k$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۹) $S_j^k$ = برای تابع هدف مینیمم $\dfrac{\text{کمینه ارزش هدف } k \text{ در کل راه‌حلها}}{\text{ارزش هدف } k \text{ در کروموزوم } j}$

(۱۰) $S_j^k$ = برای تابع هدف ماکزیمم $\dfrac{\text{ارزش هدف } k \text{ در کروموزوم } j}{\text{کمینه ارزش هدف } k \text{ در کل راه‌حلها}}$

دو روش برای رده بندی راه حل ها وجود دارد تا به تصمیم گیرنده برای انتخاب راه حل مناسب کمک کند.

الف- چنانچه کلیه توابع هدف از نظر تصمیم‌گیرنده ارزش یکسانی داشته باشند، وزن راه حل j از حاصل ضرب $S_j^k$ هرکدام از توابع هدف به صورت زیر محاسبه می شود.

$$W_j = \prod_k S_j^k \qquad (۱۱)$$

ب- اگر تصمیم گیرنده به کلیه توابع هدف ارزش یکسانی ندهد، میزان برتری توابع هدف نسبت به هم تعیین شده و مجموع وزن راه حل مذکور محاسبه می شود.

$$W_j = \sum_k (P^k \times S_j^k) \qquad (۱۲)$$

هر کروموزومی که وزن بیشتری داشته باشد به عنوان راه حل بهینه تخصیص لوکوموتیو انتخاب و به عنوان ورودی برای فاز زمانبندی وارد می شود.

## ۵. روش حل مسئله زمانبندی قطارهای باری

در فاز قبلی، زمان آماده سازی رامهای باری به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شده بود. سپس راه‌حلهای موجود برای

تخصیص لوکوموتیو رده‌بندی شدند. بر مبنای این رده‌بندی، بهترین تخصیص لوکوموتیو برای رامهای باری انتخاب شد. در این فاز از یک الگوریتم ژنتیک دیگر برای زمانبندی قطارهای باری تشکیل شده و همچنین لکوموتیوهای غیرفعال در یک شبکه مسافری استفاده می‌شود. الگوریتم استفاده شده برای زمانبندی قطارهای باری بر اساس الگوریتم ارایه شده توسط گادوین و همکاران [Godwin, Gopalan and Narendarn, 2006] برای شرایط راه آهن ایران توسعه داده شده است.

با توجه به اینکه لوکوموتیوهای غیرفعال نیز مانند سایر قطارها به برنامه زمانی برای حرکت خود نیاز دارند، این لوکوموتیوها به عنوان قطارهای مجازی در نظرگرفته می‌شوند. این الگوریتم ژنتیک محدودیتها و اولویتهای مربوط به تخصیص لوکوموتیو را نیز اعمال می کند.

### ۵-۱ نمایش جوابها

در این مرحله، طول کروموزوم برابر با مجموع تعداد قطارهای باری و تعداد لوکوموتیوهای غیرفعال است. مطابق شکل ۲ محتوای ژنها بیانگر شماره قطار باری یا لکوموتیو غیرفعال است. مکان ژنها در هر کروموزوم نشان دهنده ترتیب برنامه‌ریزی برای قطارهای باری و لکوموتیوهای غیرفعال است.

### ۵-۲ جمعیت اولیه

در این مرحله، یک جمعیت اولیه از کروموزومها به صورت تصادفی تولید می‌شود. اندازه جمعیت لازم است به‌گونه‌ای باشد که از تنوع و گوناگونی کافی برخوردار باشد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده، جمعیتی با اندازه سه برابر طول کروموزومها، انتخاب شده است.

### ۵-۳ ترمیم کروموزومها

مکان ژنها در هر کروموزوم نشان دهنده ترتیب برنامه‌ریزی برای قطارهای باری و لکوموتیوهای غیرفعال موجود است که به‌آن توالی کلی[۲۹] کروموزوم گفته می‌شود. هر لوکوموتیو در یک کروموزوم دارای یک توالی محلی[۳۰] نیز هست. توالی محلی یک لکوموتیو بیان کننده ترتیب حمل رامهای باری توسط آن لکوموتیو است که در فاز یک تعیین می شود. امکان سنجی کروموزومها بایستی تأیید کند که توالی کلی کروموزوم با توالی محلی لکوموتیوها مغایرتی ندارد. برای ترمیم کروموزومهایی که توالی کلی و توالی محلی آنها با هم مغایرت دارد لازم است به صورت زیر عمل شود:

الف- در کروموزوم مورد نظر شماره قطارهای باری که توالی محلی آنها نقض شده است تعیین شود.

ب- مکان این قطارهای باری در کروموزوم شناسایی و علامتگذاری شود.

ج- شماره قطارهای تخصیص داده شده به لوکوموتیو که مکان آنها در کروموزوم نشانه‌گذاری شده، با توجه به توالی محلی آن جایگزین شوند.

### ۵-٤ تعیین مسیرحرکت قطارهای باری

این روش برای تعیین مسیر و زمانبندی قطارهای باری در یک شبکه مسافری مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی این روش، یافتن یک برنامه زمانیِ امکان‌پذیر برای قطارهای باری است. قطارهای باری به صورت جداگانه تعیین مسیر و زمانبندی می‌شوند. به منظور جلوگیری از تقابل زمانی قطارهای باری، پنجره زمانی مورد استفاده قطارهای باری زمانبندی شده به‌روز

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۸ | ۹ | ۶ | ۲ | ۷ | ۳ | ۴ | ۱ |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |

شماره قطاربازی

ترتیب برنامه ریزی قطارها

شکل۲. نمایش کروموزوم‌های فاز دو

رسانی می شود.

در یک شبکه ریلی مسافری، قطارهای مسافری از بالاترین اولویت برخوردارند و برنامه زمانبندی آنها ثابت است. این درحالی است که قطارهای باری و لوکوموتیوهای غیرفعال از کمترین اولویت برخوردار بوده و در فاصله زمانی بین قطارهای مسافری گنجانده می‌شوند. هدف اعزام کننده این است که قطارهای باری و لوکوموتیوهای غیرفعال را در کمترین زمان ممکن به مقصد آنها اعزام کند.

## ۵-۵ ارزیابی برنامه زمانبندی قطارهای باری

برای ارزیابی کروموزومها لازم است ابتدا میزان برازندگی آنها تعیین شود. با توجه به این که قطارهای باری یک زمان دقیق از پیش برنامه‌ریزی شده برای وصول به مقصد خود ندارند، در نتیجه برای راه حل منتخب، لازم است که یک حد پایین برای زمان رسیدن قطار به مقصد تعیین شود.

تعیین حد پایین زمان رسیدن قطار به مقصد به صورت زیر انجام می‌گیرد:

الف- راه حل انتخاب شده در فاز یک در نظر گرفته می‌شود.

ب- زمان آماده سازیِ اصلاح شده[۳۱] برابر با بیشینه زمان آماده‌سازی رامهای باری و زمان تخصیص لکوموتیو در نظر گرفته می شود.

ج- با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی اصلاح شده برای قطارهای باری، زمان مورد انتظار برای رسیدن قطارها به مقصدشان به عنوان حد پایین تعیین می‌شود. حد پایین زمان رسیدن قطارهای باری به مقصدشان، به عنوان یک زمان مناسب برای ارزیابی توابع هدف بکار می‌رود.

کمینه کردن میزان کل تأخیرات، به عنوان یک هدف اولیه برای ارزیابی برنامه زمانبندی قطارهای باری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین کمینه کردن میزان بیشینه تأخیر به عنوان هدف ثانویه برای تعیین برازندگی کروموزومها استفاده می شود. تعداد قطارهای دارای تأخیر نیز برای تکمیل اطلاعات مربوط به کیفیت برنامه زمانبندی محاسبه می شود.

پارامترها و متغیرهای لازم برای تعیین برازندگی کروموزومها:

$f$: اندیس قطار باری

$DD_f$: حد پایین برای زمان رسیدن قطار باری fبه مقصد

$AT_f$: زمان حقیقی رسیدن قطار fبه مقصد

هدف اولیه

$$\text{کل زمان تاخیرات} = \sum_f (AT_f - DD_f) \qquad (۱۳)$$

هدف ثانویه

$$\text{بیشینه میزان تاخیر} = Max\left\{0, Max\left|AT_f - DD_f\right|\right\} \qquad (۱٤)$$

$$\text{تعداد قطارهای با تاخیر} = \sum_f n_f \qquad (۱۵)$$

$$n_f = \begin{cases} 1 & if \quad (AT_f - DD_f) > 0 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

از رابطه ۱٦ برازندگی کروموزومها (F) محاسبه می گردد. در صورتی که ۳ برابر نسبت کل زمان تأخیرات به تعداد قطارهای با تأخیر کمتر از بیشترین مقدار تأخیر باشد C مقدار ۰/۵ و در غیر این صورت مقدار ۱ را می گیرد.

$$F = \frac{C}{\text{کل زمان تاخیرات} + 1} \qquad (۱٦)$$

## ۵-٦ انتخاب برای تولید مثل

مشابه الگوریتم ژنتیک فاز یک، عملگر تولید مثل برای انتخاب کروموزوم های والد بر مبنای میزان برازندگی آنها بکار می رود و بر اساس روش گلدبرگ از میان تعداد $N_{pop}$ کروموزوم، احتمال انتخاب هر کروموزوم به‌عنوان والد مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

## ۵-۷ بازترکیب و جهش

عملگر بازترکیب و عملگر جهش این فاز نیز عینار مشابه فاز اول اعمال می شود.

## ۵-۸ انتخاب کروموزومها برای نسل جدید

همان گونه که پیش از این در الگوریتم ژنتیک فاز یک بیان شد، انتخاب نسل جدید کروموزومها از میان جمعیت کروموزومهای والد و جمعیت کروموزومهای فرزند صورت می‌گیرد. بر اساس استراتژی بکاررفته در این فاز بهترین $(N_{pop}/2)$ کروموزوم از میان جمعیت کروموزومهای والد و بهترین $(N_{pop}/2)$ کروموزوم از میان جمعیت کروموزومهای فرزند انتخاب شده تا نسل جدید با اندازه $N_{pop}$ تولید شود.

### ۵-۹ شرط خاتمه

بعد از تولید تعداد کافی جمعیت‌های کروموزومها، ممکن است بهبود چشمگیری در وضعیت کروموزومها صورت نگیرد. مطابق فاز یک اگر برای بیست نسل متوالی از کروموزومها پیشرفتی رخ ندهد، الگوریتم ژنتیک خاتمه پیدا می‌کند.

بعد از اتمام تولید نسلهای جدید، با بکارگیری روابط ۹،۱۰ و۱۱ در فاز یک مقدار w برای هر کروموزوم محاسبه شده و کروموزومی که بالاترین w را داشته باشد به عنوان کروموزوم بهینه و خروجی فاز دو انتخاب می‌شود.

## ٦. یک مثال ساده

در این بخش برای نشان دادن نحوه مدل سازی و همچنین روشهای حل، یک مثال ساده ارایه و تشریح می‌شود. در این مثال ساده، چهار ایستگاه به صورت نشان داده شده در شکل ۳ وجود دارد. مدت زمان سیر قطارهای باری در فواصل بلاکها در جدول ۱ ارایه شده است. اطلاعات مورد نیاز درمورد مبدا، مقصد و زمان آماده سازی رامهای باری مطابق جدول ۲ است. به علاوه تعداد لکوموتیوها و موقعیت آنها در آغاز مسئله به عنوان ورودیهای مسئله مورد نیاز است که در جدول ۳ ذکر شده است. از آن جایی که در مسئله لازم است که زمانبندی قطارهای باری در فاصله زمانی بین قطارهای مسافری انجام شود، بنابر این گراف مکان-زمان قطارهای مسافری مطابق شکل ٤ و به عنوان یکی دیگر از ورودیهای مسئله ارایه شده است.

شکل۳. شبکه فرضی مثال ساده

جدول ۱. مدت زمان متوسط سیر قطارهای باری در بلاک ها

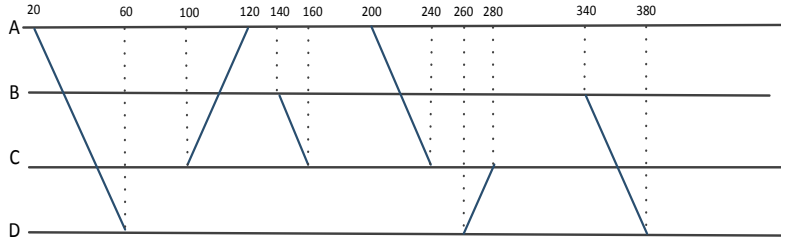
| بلاک | مدت زمان سیر قطار باری در بلاک (دقیقه) |
|---|---|
| A-B | ۵۰ |
| B-C | ۲۰ |
| C-D | ۳۰ |

جدول ۰۲ اطلاعات مربوط به رامهای باری

| شماره رام باری | مبدا | مقصد | زمان آماده سازی رام باری(دقیقه) |
|---|---|---|---|
| ۱ | B | D | ۰ |
| ۲ | C | A | ۲۰ |
| ۳ | C | B | ۰ |
| ۴ | B | A | ۳۵ |
| ۵ | A | C | ۰ |
| ۶ | D | C | ۱۰ |

جدول۳. اطلاعات لکوموتیوها

| شماره لکوموتیو | موقعیت اولیه لکوموتیو |
|---|---|
| ۱ | B |
| ۲ | A |
| ۳ | B |




شکل ٤. گراف مکان – زمان برای حرکت قطارهای مسافری (زمان بر حسب دقیقه)

جدول٤. پارامترهای به دست آمده برای لکوموتیوهای کروموزوم بهینه درفاز یک

| شماره لکوموتیو | رامهای حمل شونده توسط لکوموتیو | مدت زمان حمل لکوموتیو(دقیقه) | مدت زمان غیرفعال لکوموتیو(دقیقه) | مدت انتظار رامهای باری برای لکوموتیو(دقیقه) | ماکزیمم زمان انتظار رامها برای لکوموتیو(دقیقه) | بهره‌وری لکوموتیو |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱و۳و۴ | ۱۲۰ | ۳۰ | ۱۴۵ | ۸۰ | ۰/۸ |
| ۲ | ۵و۶ | ۱۰۰ | ۳۰ | ۹۰ | ۹۰ | ۰/۷۶ |
| ۳ | ۲ | ۷۰ | ۲۰ | ۰ | ۰ | ۰/۷۸ |
| درمجموع | - | ۲۹۰ | ۸۰ | ۲۳۵ | ۹۰ | - |

جدول۵. پارامترهای محاسبه شده برای کروموزوم بهینه فاز یک

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| $F_1$ | ۱ |
| $F_2$ | ۱ |
| F | ۱ |
| $P_{select}$ | ۰/۱۴۹ |
| $S^k_j$ (min) | ۱ |
| $S^k_j$(max) | ۰/۹۶ |
| $W$ | ۰/۹۶ |

## ٦-۱ تخصیص لکوموتیو به رامهای باری

با پیاده‌سازی فاز یک مطابق آنچه در بخش چهارم ذکر شد، کروموزوم بهینه برای تخصیص لکوموتیو با W=0.96 انتخاب شد. کروموزوم بهینه به دست آمده در این فاز مطابق شکل ۵، مقادیر هریک از پارامترهای مربوط به لکوموتیوهای این کروموزوم مطابق جدول ٤ و پارامترهای مربوط به برازندگی،

احتمال انتخاب این کروموزوم به عنوان والد و ارزش وزنی کروموزوم بهینه در جدول ۵ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که هدفهای چهارگانه مورد نظر در فاز یک جهت بیشینه یا کمینه کردن در این مسئله با ارزش وزنی یکسان درنظر گرفته شده و اولویت بندی نمی شوند.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ |

**شکل۵. کروموزوم بهینه برای تخصیص لکوموتیو**

## ۶-۲ زمانبندی قطارهای باری

با وارد کردن کروموزوم بهینه فاز قبلی و پیاده‌سازی فاز دوم مطابق آن چه در بخش پنجم ذکر شد، کروموزوم بهینه برای زمانبندی قطارهای باری و لکوموتیوهای غیرفعال با $W=۰.۸۹۷$ مطابق شکل ٦ انتخاب شد. زمان مورد انتظار و زمان حقیقی رسیدن قطارهای باری به مقصد و قطارهای دارای تأخیر و میزان تأخیر آنها در این کروموزوم در جدول ٦ ارایه شده است. در جدول ۷ به بیان سایر پارامترهای کروموزوم بهینه شامل برازندگی، احتمال انتخاب این کروموزوم به عنوان والد و ارزش وزنی آن پرداخته می شود. بعد از زمانبندی حرکت قطارهای باری، زمان حرکت آن از مبدا و زمان ورود آن به مقصد مطابق گراف مکان- زمان مربوط به حرکت قطارهای باری و لکوموتیوهای غیرفعال در شکل ۷ تعیین می شود. در این مرحله نیز هدف های مورد نظر برای بیشینه یا کمینه با ارزش وزنی یکسان درنظر گرفته شده و اولویت بندی نمی شوند.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۱ | ۸ | ۹ | ۶ | ۲ | ۷ | ۳ | ۴ |

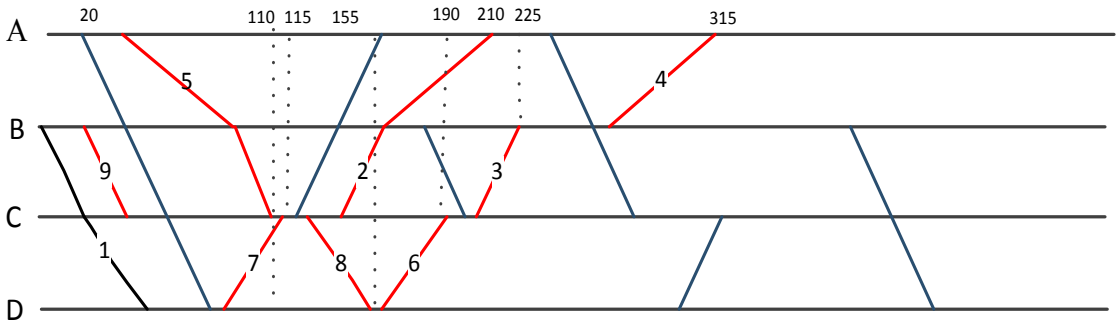
**شکل٦. کروموزوم بهینه برای زمانبندی قطارهای باری و لکوموتیوهای غیرفعال**

جدول٦. زمان مورد انتظار و زمان واقعی رسیدن قطارها به مقصد در کروموزوم بهینه فاز دو

| شماره قطار | $DD_F$ ((min | $(AT_F(min$ | قطارهای دارای تاخیر | میزان تاخیر(دقیقه) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۹۰ | ۲۱۰ | * | ۳۰ |
| ۲ | ۱۳۰ | ۱۹۰ | * | ۶۰ |
| ۳ | ۱۰۰ | ۱۵۵ | * | ۵۵ |
| ۴ | ۲۰ | ۴۰ | * | ۲۰ |
| ۵ | ۵۰ | ۵۰ | | ۰ |
| ۶ | ۷۰ | ۱۱۰ | * | ۴۰ |
| ۷ | ۸۰ | ۱۱۵ | * | ۳۵ |
| ۸ | ۱۰۰ | ۲۲۵ | * | ۱۲۵ |
| ۹ | ۱۵۰ | ۳۱۵ | * | ۱۶۵ |

جدول۷. پارامترهای محاسبه شده برای قطارهای باری کروموزوم بهینه فاز دو

| پارامتر | مقدار محاسبه شده |
|---|---|
| $F$ | ۰/۰۰۱۲۸ |
| $P_{select}$ | ۰/۰۳۷۱ |
| $(S_j^k(min$ | ۰/۸۹۷ |
| $W$ | ۰/۸۹۷ |




شکل۷. گراف مکان– زمان برای وارد کردن قطارهای باری در فاصله قطارهای مسافری(زمان بر حسب دقیقه)

جدول ۸. مقادیر مربوط به پارامترهای الگوریتم ژنتیک

| پارامتر | مقدار پارامتر | |
|---|---|---|
| | الگوریتم ژنتیک فاز یک | الگوریتم ژنتیک فاز دو |
| طول کروموزوم | تعداد رامهای باری | تعداد رامهای باری+تعداد لکوموتیوهای غیرفعال |
| اندازه جمعیت ( $N_{pop}$ ) | طول کروموزوم* 3 | طول کروموزوم*3 |
| تعداد کروموزوم های والد | $(N_{pop}/3)$ | $(N_{pop}/2)$ |
| تعداد کروموزم های فرزند | $2\times(N_{pop}/3)$ | $(N_{pop}/2)$ |
| احتمال جهش | ۰/۲ | ۰/۲ |
| احتمال بازترکیب | ۰/۸ | ۰/۸ |
| احتمال بکارگیری روش ابتکاری مبتنی بر زمان غیر فعال لکوموتیوها | ۰/۵ | - |
| احتمال بکارگیری روش ابتکاری مبتنی بر زمان زمان انتظار رامهای باری | ۰/۵ | - |

## ۷. نتایج حل مسائل آزمایشی

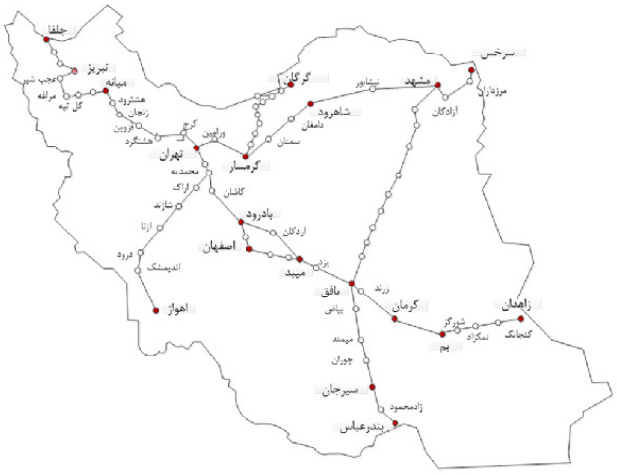
در این بخش نتایج حاصل از پیاده سازی روشهای تشریح شده برای حل مسئله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری برای شبکه راه آهن ایران ارایه می شود. این روشها با استفاده از زبان برنامه نویسی جاوا پیاده سازی شده است. به منظور پیاده سازی الگوریتم های ژنتیک در فاز تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری، پارامترهای الگوریتم ژنتیک هر فاز و مقادیر آن مطابق جدول ۸ استفاده شده است.

به منظور بررسی کارآیی الگوریتم بکار گرفته در حل ترکیبی مسئله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری، شبکه راه آهن جمهوری اسلامی در نظر گرفته شده است. راه آهن ایران در حال حاضر دارای بالغ بر نه هزار و هفتصد کیلومتر خط اصلی است که سالانه به طور متوسط یک میلیون و پانصد هزار نفر مسافر و بیست و هشت میلیون تن بار از طریق این خطوط جابه‌جا می‌گردد. این شبکه در مجموع دارای ٤٦٢ ایستگاه بوده که از این تعداد ۲۰ ایستگاه به صورت تشکیلاتیِ گار است[I.R.I. Railway. Annual Statistical Yearbook, 2010].

در مسئله مورد نظر، بخشی از شبکه راه آهن ایران با یک سری از داده‌های واقعی شامل ایستگاههای گار شبکه راه آهن و بلاک های بین آنها، مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شده اند. از آن جایی که روش بکار رفته در حل مسئله مورد نظر ما به صورت عملیاتی است، اطلاعات مربوط به تعداد رامهای باری و لکوموتیوهای در دسترس به صورت لحظه‌ای مورد نیاز است که در مورد راه‌آهن ایران، دستیابی به این اطلاعات با این ویژگی‌ها امکان‌پذیر نبود، بنابر این اطلاعات مربوط به تعداد رامهای باری، لکوموتیوها و موقعیت آنها به صورت فرضی برای سی مسئله با ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از حل آنها با روشهای مورد استفاده، در جدول ۹ ذکر شده است.

**جدول ۹. نتایج حاصل از پیاده سازی ۳۰ مسئله شبیه سازی شده برای راه آهن ایران**

| شماره مسئله | تعداد لکوموتیوها | تعداد رامهای باری | $W$ کروموزوم بهینه فاز اول | $W$ کروموزوم بهینه فاز دوم | تاخیر(دقیقه) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵ | ۵ | ۱ | ۱ | ۴۶۶۵ |
| ۲ | ۵ | ۵ | ۱ | ۱ | ۵۱۶۰ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۱ | ۱ | ۸۱۰۵ |
| ۴ | ۵ | ۵ | ۱ | ۰/۸۳۶ | ۹۴۷۰ |
| ۵ | ۵ | ۵ | ۱ | ۱ | ۸۷۷۰ |
| ۶ | ۵ | ۱۰ | ۱ | ۱ | ۱۲۱۰۰ |
| ۷ | ۵ | ۱۰ | ۱ | ۰/۹۲۰ | ۱۸۱۲۵ |
| ۸ | ۵ | ۱۰ | ۱ | ۰/۸۱۲ | ۱۳۶۶۵ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۱ | ۰/۹۳۵ | ۱۳۸۱۰ |
| ۱۰ | ۵ | 10 | ۱ | ۰/۹۶۶ | ۱۶۴۷۵ |
| ۱۱ | ۵ | ۱۵ | ۰/۹۳۶ | ۰/۶۹۰ | ۴۲۶۶۵ |
| ۱۲ | ۵ | ۱۵ | ۰/۹۲۷ | ۰/۶۰۷ | ۶۴۱۰۵ |
| ۱۳ | ۵ | ۱۵ | ۱ | ۰/۶۹۱ | ۶۱۷۹۵ |
| ۱۴ | ۵ | ۱۵ | ۱ | ۰/۶۸۹ | ۵۸۱۳۰ |
| ۱۵ | 5 | ۱۵ | ۱ | ۰/۶۷۱ | ۴۴۰۱۵ |
| ۱۶ | ۱۰ | ۱۵ | ۱ | ۰/۹۵۲ | ۱۹۹۴۵ |
| ۱۷ | ۱۰ | ۱۵ | ۱ | ۰/۶۳۹ | ۳۷۰۰۰ |
| ۱۸ | ۱۰ | ۱۵ | ۱ | ۰/۶۸۶ | ۳۴۱۷۰ |
| ۱۹ | ۱۰ | ۱۵ | ۱ | ۰/۸۶۶ | ۵۲۵۶۰ |
| ۲۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۱ | ۰/۸۵۳ | ۵۰۱۲۰ |
| ۲۱ | ۱۰ | ۲۰ | ۰/۹۶۶ | ۰/۶۲۷ | ۵۸۹۸۰ |
| ۲۲ | ۱۰ | ۲۰ | ۱ | ۰/۸۶۱ | ۳۹۵۳۵ |
| ۲۳ | ۱۰ | ۲۰ | ۰/۹۵۳ | ۰۶۱۳ | ۸۲۶۶۵ |
| ۲۴ | ۱۰ | ۲۰ | ۰/۹۲۲ | ۰/۶۲۶ | ۵۶۷۶۵ |
| ۲۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۱ | ۰/۶۷۸ | ۷۱۷۵۵ |
| ۲۶ | ۱۰ | ۲۰ | ۰/۹۱۷ | ۰/۸۷۶ | ۸۸۹۶۵ |
| ۲۷ | ۱۵ | ۲۰ | ۰/۹۱۸ | ۰/۷۰۸ | ۷۹۱۷۵ |
| ۲۸ | ۱۵ | ۲۰ | ۱ | ۰/۵۷۴ | ۷۱۱۰۰ |
| ۲۹ | ۱۴ | ۲۰ | ۱ | ۰/۵۸۴ | ۶۳۷۲۵ |
| ۳۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۰/۹۰۴ | ۰/۶۶۰ | ۹۴۵۴۵ |




**شکل۸. شبکه راه آهن ایران**

## ۸. نتیجه گیری

در این مقاله به حل مسئله تخصیص لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری به صورت ترکیبی پرداخته شد. به منظور حل مسئله مذکور، دو الگوریتم ژنتیک در دو مرحله مجزا، پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتمها بر روی تعدادی از مسائل منطبق با شرایط راه آهن ایران با ابعاد متفاوت پیاده سازی شده و کارآیی آنها نشان داده شده است. با توجه به هزینه‌های عملیاتی زیاد لکوموتیوها و تأثیر تخصیص بهینه آنها در کاهش جابجایی‌های غیرفعال لکوموتیوها و تأخیرهای حاصل از آن و با توجه به هزینه‌هایی که دیرکرد ناشی از عدم برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب قطارها بر سیستم حمل و نقل ریلی وارد می‌کند، اجرای مدل ارایه شده در این مقاله برای تخصیص همزمان لکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری در راه‌آهن‌هایی نظیر راه‌آهن ایران که قطارهای باری آنها بدون برنامه بوده، باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های حمل و نقل شده و به مدیران صنعت حمل و نقل ریلی در برنامه‌ای کردن و بهبود شبکه حمل و نقل و اتخاذ تصمیمات مناسب‌تر یاری می‌رساند. می توان در تحقیقات آتی، حل این مسئله با استفاده از سایر الگوریتم های موجود نظیر دیگر الگوریتم های فرا ابتکاری را مورد توجه قرار داد.

## ۹. پی نوشتها

1- Freight Rake
2- Deadhead
3- Coupling Delay
4- Operational
5- Genetic Algorithm
6- Population-Based Metaheuristic
7- Lagrangian Relaxation
8- Heuristic
9- Branch and Bound
10- Dantzig-Wolfe Decomposition
11- Branch-and-Cut
12- Benders
13- Mixed-integer Programming
14- Vehicle Routing
15- Robustness
16- Job Shop Scheduling problem
17- Deadheading Time
18- Multi-objective
19- Chromosome Representation
20- Initialization of the population

21- Evaluation measure
22- Crossover
23- Mutation
24- Selection strategy
25- Population size
26- Fitness
27- Locomotive utilization
28- Offspring
29- Global Sequence
30- Local Sequence
31- Corrected ready time

## ۱۰. مراجع


- یقینی، م.، لسان، ج (۱۳۸۹)"برنامه‌ریزی عملیات حمل و نقل ریلی" ، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- راه آهن جمهوری اسلامی ایران، دفتر آمار و فناوری اطلاعات(۱۳۷۹) «سالنامه آماری حمل‌ونقل ریلی کشور».

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

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

- Booler, J. M. P. (1995) "A note on the use of Lagrangean relaxation in Railway scheduling", Journal of the Operational Research Society, 46, pp. 123-127.

- Cacchiani, V., Caprara, A. and Toth, P. (2008) "A column generation approach to train timetabling on a corridor4 ," OR 6, pp. 125-142.

- Caprara, A., Monaci, M., Toth, P. and Guida, P. L. (2006) "A lagrangian heuristic algorithm for a real-word train timetabling problem", Discrete Applied Mathematics, 154, pp. 738-753.

- Carey, M. and Lockwood, D. (1995) "A model, algorithms and strategy for train pathing", Journal of the Operational Research Society, 46, pp. 988-1005.

- Cordeu, J.-F., Desaulniers, G., Lingaya, N., Soumis, F. and Desrosiers, J. (2001) "Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada", Transportation Research- B35, pp. 767-787.

- Cordeu, J.-F., Soumis, F. and Desrosiers, J. (2000) "A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem", Transportation Science, 34, (2), pp. 133-149.

- D'Angelo, G., Di Stefano, G. and Navarra,

A. ( 2009) "Evaluation of recoverable –robust timetable on tree networks20 ,"th international workshop on Combinational Algorithms (IW-OCA 2009), Lecture Notes in Computer Science, 5874, pp. 24-35.

- Dorfman, M. J. and Medanic, J. (2004) "Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic", Transportation Research - B 38, (1) , pp. 81-98.

- Fischetti, M. and Toth, P. (1997) “A package for locomotive scheduling”, Technical Report DEIS-OR16-97-, University of Bologna, Italy.

- Forbes, M. A., Holt, J. N. and Watts, A.M. (1991) "Exact solution of locomotive scheduling problems", Journal of the Operational Research Society, 42, (10), pp. 825-831.

- Ghoseiri, K. and Ghandpour, S. F. (2010) “A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows”, Journal of Applied Soft Computing,10, pp. 53-65.

- Ghoseiri, K., Szidarovszky, F. and Asgharpour, M. J. (2004) "A multi objective train scheduling model and solution", Transportation Research-B 38, (10) , pp. 927-952.

-Godwin, T., Gopalan, R. and Narendran, T. T. (2006) "Locomotive assignment and freight train scheduling using genetic algorithms", International Transactions in Operational Research, 13, pp.299-332.

- Goldberg, D. E. (1989) "Genetic algorithms in search and optimization and machine learning", Addison-Wesley Publishers, Massachussets.

- Jovanovic, D. and Harker, P.T. (1991) "Tactical scheduling of rail operations: the SCAN I system. Transportation Science 25, (1), pp. 46-64.

- Kraay, D., Harker, P.T. and Chen, B. (1991) "Optimal pacing of trains in freight railroads: model formulation and solution", Operations Research 39, (1), pp. 82-99.

- Kuo, C. C. and Nicholls, G. M. (2007) “A mathematical modeling approaches to improving locomotive utilization at a freight railroad”, OMEGA, the International Journal of Management Science, 35, pp. 472485-.

- Noori, S. and Ghannadpour, S. F. (2012) "

Locomotive assignment problem with trains precedence using genetic algorithm", Journal of Industrial Engineering International, 8:9.

- Nou, A., Desrosiers, J. and Soumis, F. (1997) “Weekly locomotive scheduling at Swedish state railways”, Technical Report, G35-97-.Gerad, Canada.

- Orda, A. and Rom, R. (1990) "Shortest-path and minimum-delay algorithms in networks with time-dependent edge-length", Jurnal of the Association for Computing Machinery 37, (3), pp. 607-625.

- Rouillon, S., Desaulniers, G. and Soumis, F. (2006) “An extended branch-and-bound method for locomotive assignment”, Transportation Research, 40, pp. 404-423.

- Salim, V. and Cai, X. (1997) "A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations", Environmental modeling and Software 12, (4), pp.301-309.

- Shafia, M. A. , Jamili, A. and Pourseyedaghaee, M. (2010) "A new mathematical model for the job shop scheduling problem with uncertain processing times", International Journal of Industrial Engineering Computations, 2, pp. 295-306.

- Shafia, M. A., Pourseyedaghaee, M., Sajadi, S.J. and Jamili, A. (2011) "Robust train timetabling problem: Mathematical model and Branch and bound algorithm", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, accepted manuscript.

- Shafia, M. A., Sajadi, S. J., Jamili, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Pourseyedaghaee, M. (2012) "The periodicity and robustness in a single-track train scheduling problem", Journal of Applied Soft Computing, 12, pp. 440-452.

- Vaidyanathan, B., Ahuja, R., Liu, J. and Shughart, L. (2008) “Real-life locomotive planning: New formulations and computational results”, Transportation research, 42, pp. 147-168.

- Wright, M. B. (1989) "Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem", Journal of the Operational Research Society 40, (2), pp. 187-192.

- Zhou, X. and Zhong, M. (2005) "Bicriteria train scheduling for high-speed passenger rail-

road planning applications", European Journal of Operational Research 167, (3), pp. 752-771.

- Zhou, X. and Zhong, M. (2007) "Single-track train timetabling with guaranteed optimally: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bound", Transportation Research: part B, 41, pp. 320-341.

- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Gelinas, S. and Saintonge, A. (1997) " Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America", European Journal of Operational Research, 97, pp. 281292-.

- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J. and Solomon, M. M. (1999) "A branch-first, cut second approach for locomotive assignment", Management Science, 45, pp.11561168-.