

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

مسعود یقینی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مهسا سادات میرقوامی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد شماعی‌زاده، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: yaghini@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵

چکیده

اهمیت نگهداری و تعمیر در هر سیستمی که اجزای آن حین بهره‌برداری فرسوده می‌شوند، بر کسی پوشیده نیست. سیستم حمل‌ونقل ریلی نیز، به‌عنوان یک سیستم عمومی و سراسری، نیازمند پایش، نگهداری و تعمیرات دائمی است، زیرا قابلیت اطمینان، ایمنی و بهره‌وری آن بسیار وابسته به کیفیت خطوط ریلی است. با توجه به آنکه طول خطوط ریلی و حجم نگهداری و تعمیر مورد نیاز بسیار بالاست، استفاده از نیروی انسانی جهت اجرای پروژه‌ها، غیراقتصادی و عملاً غیرممکن است. این کار توسط ماشین‌آلات مکانیزه مورد استفاده در خطوط ریلی انجام می‌شود. به دلیل تعداد محدود این ماشین‌ها و لزوم اجرای هر چه بیشتر پروژه‌ها، ارائه یک روش ابتکاری که بتواند همزمان هم اهداف مورد نظر را لحاظ کند و هم تمام اولویت‌ها و نیازمندی‌های راه‌آهن را در برگیرد، ضروری است. در این مقاله، فرآیند برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر خطوط ریلی در راه‌آهن ج.ا.ا. مورد بررسی قرار گرفته است. جهت برنامه‌ریزی این عملیات، یک الگوریتم ابتکاری طراحی و ارائه شده است. برای آنکه قابلیت الگوریتم بهتر دیده شود، نتایج الگوریتم با برنامه تهیه شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا. در سال، مقایسه شده است. جهت اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی یک مدل شبیه‌سازی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته حجم عملیات برنامه‌ریزی شده را بطور قابل توجهی افزایش دهد. تهیه برنامه در مدت زمان بسیار کوتاه و رعایت تمام الزامات و اولویت‌های راه‌آهن از دیگر مزیت‌های الگوریتم ابتکاری پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر راه‌آهن ج.ا.ا.، زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه خط، روش حل ابتکاری

۱. مقدمه

امروزه حمل‌ونقلی ریلی به‌عنوان یک شیوه حمل‌ونقل ایمن و کم‌هزینه بسیار مورد توجه است. حفظ این ویژگی مستلزم حفظ کیفیت و ایمنی خطوط ریلی به‌عنوان زیرساخت اصلی این سیستم است. این موضوع عموماً توسط عملیات نگهداری و تعمیر (نت) خطوط پیگیری می‌شود. عملیات نت در کشورهای مختلف به شیوه‌های گوناگونی اجرا می‌شود. در کشور ایران نیز سالانه حجم بالایی از عملیات نگهداری و تعمیر خطوط تعریف و اجرا می‌شود. مسلم است که اجرای این حجم بالا از عملیات، نیازمند یک برنامه زمان‌بندی کارآمد است که در ابتدای سال باید تهیه شود.

سالانه هزینه‌های زیادی صرف عملیات نگهداری و تعمیر خطوط ریلی در سراسر جهان می‌شود. برای مثال، در کشورهای اروپایی سالانه حدود ۱۵ تا ۲۵ بلیون یورو صرف تعمیر، بازسازی و نگهداری خطوط ریلی، به طول تقریبی ۳۰۰ هزار کیلومتر می‌شود که رقمی معادل ۷۰ هزار یورو به ازای هر کیلومتر می‌شود [Lidén, 2015]. در استرالیا ۲۵ تا ۳۵ درصد هزینه بهره‌برداری راه‌آهن مربوط به هزینه‌های نگهداری و تعمیر خطوط می‌شود. درآمد سالیانه حمل‌ونقل ریلی آمریکا ۵۶,۶ میلیارد دلار است که حدود ۱۳٪ آن یعنی ۶,۹ میلیارد دلار به‌صورت سالیانه صرف نگهداری و تعمیر خط می‌گردد [Li, Balakrishnan and Roth, 2009]. صنعت حمل‌ونقل ریلی ج.ا.ا. نیز از این قاعده مستثنا نیست و بطور میانگین از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶، سالانه حدود ۳۰ درصد از کل اعتبارات پرداختی توسط راه‌آهن صرف عملیات بهسازی، بازسازی و نگهداری خطوط شده است [Iran Railways Statistical Yearbook, 2006-2017]. در سال ۹۶ نیز هزینه نگهداری، بهسازی و بازسازی به طور متوسط ۶۴ میلیون تومان به ازای

هر کیلومتر در سال بوده است [Fathali and Zakeri, 2015].

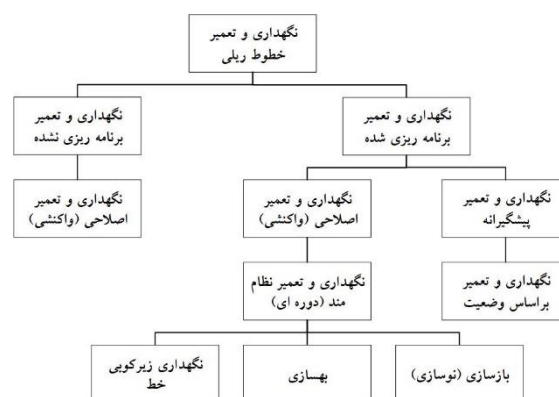
عملیات نگهداری و تعمیر خطوط ریلی در ایران را می‌توان به دو دسته برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ریزی نشده تقسیم کرد (شکل ۱). در نت برنامه‌ریزی شده با استفاده از انجام نگهداری و تعمیر پیشگیرانه^۱، از به وجود آمدن عیوب و نواقص بزرگ جلوگیری می‌شود. همچنین در صورت مواجهه با معایب خط پس از حوادث و سوانح، نگهداری و تعمیر اصلاحی به انجام می‌رسد. از سوی دیگر در قسمت نگهداری و تعمیر بر اساس وضعیت، معاینه و بازدید از اجزای خط، کنترل هندسه خط و بازرسی‌های برنامه‌ریزی شده اتفاق می‌افتد تا معایب خط زودتر شناسایی شده و از مسدودی‌های طولانی مدت خط جلوگیری شود. قسمت نگهداری و تعمیر نظام‌مند (دوره‌ای) نیز شامل سه بخش بازسازی (نوسازی)، بهسازی و نگهداری زیرکوبی خط است که جهت بروز نگهداشتن خط و ادوات، در بازه‌های زمانی مشخص یا پس از عبور بار ترافیکی مشخصی صورت می‌گیرد. در بهسازی خطوط که حداکثر هر ده سال یک‌بار باید انجام گردد، رفع مشکل آلودگی بالاست، تعویض قطعات معیوب اجزاء خط و رفع معایب هندسی خط، بالاست‌ریزی و زیرکوبی صورت می‌پذیرد. بازسازی (نوسازی)، پس از دو یا سه بار بهسازی بصورت برچیدن روسازی قدیمی و تعویض آن، تسطیح بستر و تحکیم زیرسازی انجام می‌شود. نگهداری زیرکوبی خط نیز به‌صورت هفتگی، ماهانه یا سالانه انجام شده و در آن نیاز به تجهیزات دستی و برخی از ماشین‌های راه‌سازی یا مکانیزه خط وجود دارد. بازرسی، اصلاحات مشخصات هندسه خط، سنگ‌زنی و پلیسه برداری، اصلاح جوش‌های معیوب و تعمیرات پل‌ها از اهم فعالیت‌های نگهداری زیرکوبی خط است.

[Lidén, 2015]. در سطح برنامه‌ریزی بلندمدت، مسائل کلان

مرتبط با زیرساخت و شبکه ریلی مطرح است. این مسائل شامل تعیین سطح کیفیت مورد انتظار از زیرساخت، ظرفیت مورد انتظار و قابلیت اطمینان آن، طراحی شبکه و مکان‌یابی تسهیلات مربوطه است. در سطح میان‌مدت به تخصیص، زمان‌بندی و تهیه برنامه‌های میان‌مدت پرداخته می‌شود. تعیین مسدودی پروژه، تعیین و اولویت‌بندی فعالیت‌های مورد نیاز، خوشه‌بندی پروژه‌ها، زمان‌بندی نت پیشگیرانه و زمان‌بندی بازرسی‌های ریل از مباحث مهم این سطح است. در سطح برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت جزئیات برنامه‌های ارائه شده در سطح قبل مشخص می‌شود. برای مثال مثال برنامه‌های دقیق‌تر مرتبط با نحوه اجرای پروژه، برنامه کار خدمه، سیرهای مورد نیاز و جابه‌جایی مواد و مصالح تهیه می‌شود. بخش دیگری از مسائل این سطح نحوه قرارگیری ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر در طول شبکه و خصوصاً در ایستگاه‌هاست به‌نوعی که توقف آنها عملیات قطارها را با مشکل مواجه نکند.

موضوع این مقاله در سطح برنامه‌ریزی میان‌مدت و حوزه نت پیشگیرانه قرار می‌گیرد. زمان‌بندی نت پیشگیرانه با دو محوریت در ادبیات موضوع مورد توجه بوده است: زمان‌بندی با محوریت تیم‌های اجرایی و تخصیص فعالیت‌ها به آنها و زمان‌بندی با محوریت فعالیت‌های مورد نیاز و تخصیص منابع به فعالیت‌ها. مطالعات مختلفی با هر دو محوریت انجام شده است. در حوزه زمان‌بندی تیم‌های اجرایی، در مقاله پنگ و همکاران [Peng et al., 2011] شبکه راه‌آهن توسط یک مدل شبکه فضا-

زمانی^۳ نمایش داده شده است. گره‌های شبکه، شامل گره‌های دوسر فعالیت‌ها و گره شروع و پایان مجازی و کمان‌های شبکه، کمان سیر و انجام فعالیت است. واحد زمانی در این شبکه هفته است که به‌صورت تعدادی لایه نمایش داده شده است. کمان‌های سیر، گره‌های یک لایه را به هم مرتبط می‌کنند و کمان‌های انجام فعالیت باعث اتصال لایه‌های مختلف می‌شوند؛ تا در نهایت به ازای یک تیم کاری، یک شبکه ایجاد می‌شود.



شکل ۱. شیوه‌های نگهداری و تعمیر خط آهن [Zakeri and Rezazadeh, 2006]

در مقابل، نت برنامه‌ریزی نشده است که در مواقع لزوم و در اثر بروز سوانح یا حوادث طبیعی به انجام می‌رسد. این موارد به ندرت رخ داده و براساس آمار سال‌های گذشته، حداکثر عملیات نت واکنشی خط در سال، ۶ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. این مقدار نسبت به کل کیلومترمتر مورد نیاز برنامه‌ریزی بسیار ناچیز است. در نتیجه این موارد در برنامه‌ریزی راه‌آهن لحاظ نشده و در این مقاله نیز از آن چشم‌پوشی شده است. در این مقاله، در بخش دوم به مروری بر ادبیات موضوع پرداخته می‌شود. سپس فرآیند برنامه‌ریزی در راه‌آهن ج.ا.ا. در بخش سوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم الگوریتم ابتکاری پیشنهادی تشریح می‌گردد. نتایج اجرای الگوریتم در بخش پنجم ارائه می‌شود. در بخش ششم جهت اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی یک مدل شبیه‌سازی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش هفتم به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادت پرداخته می‌شود.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

برنامه‌ریزی مطرح در حوزه نگهداری و تعمیر زیرساخت‌های ریلی را می‌توان براساس افق زمانی در سه سطح سه سطح برنامه‌ریزی بلندمدت (چند سال)، میان‌مدت (چند ماه تا یک سال) و کوتاه‌مدت (چند روز تا چند ماه) دسته‌بندی کرد

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

محدودیت جانبی مسئله شامل محدودیت‌های مانع‌الجمع^۵، پنجره زمانی و اولویت‌بندی است. تابع هدف مسئله شامل کمینه سازی هزینه سیر و هزینه مربوط به نقض این محدودیت‌ها است. برای حل مدل از یک روش ابتکاری استفاده شده است.

ساختار اصلی یک پژوهش دیگر از پنگ و همکاران برای حل مسئله زمان‌بندی تیم‌های کاری [Peng and Ouyang, 2012] مشابه شبکه فضا-زمانی در نظر گرفته شده در مقاله [Peng et al. 2011] است، با این تفاوت که شامل متغیرهای پیوسته نیز است و محدودیت مانع‌الجمع را به سه دسته تقسیم کرده است: محدودیت‌های مرتبط با محیط، مرتبط با اتصالات و مرتبط با کریدورها^۶. از آنجاکه مسئله نهایی یک مسئله مسیریابی و زمان‌بندی با محدودیت‌های جانبی پیچیده است، در مقاله چند روش حل ابتکاری ارائه شده است. نتایج این مقاله در مقایسه با مقاله [Peng et al. 2011] بسیار بهتر بوده است.

مطالعات بسیاری در حوزه زمان‌بندی عملیات نت با محوریت فعالیت‌ها انجام شده است. مقاله هیگینز در سال ۱۹۹۸ [Higgins, 1998] و همچنین مقاله هیگینز و همکاران [Higgins, Ferreira and Lake, 1999] طبق ادعای نویسندگان، اولین مقالاتی هستند که زمان‌بندی فعالیت‌های نت را موردتوجه قرار دادند. در این دو پژوهش تیم‌های اجرایی نیز در نظر گرفته شده و هدف اصلی آن حداقل کردن تداخل ایجاد شده در برنامه‌ریزی حرکت قطارها است.

در یک مقاله دیگر از بودای و همکاران [Budai, Huisman and Dekker, 2006] مسئله زمان‌بندی عملیات نت پیشگیرانه برای تنها یک خط راه‌آهن موردبررسی قرار گرفته است. فعالیت‌ها به دو گروه فعالیت‌های جاری نت (با دوره زمانی کوتاه و دوره‌ای) و پروژه‌ها (با دوره زمانی بلند و یکبار در کل برنامه) تقسیم شده است. مقاله شامل دو بخش اصلی است. در قسمت اول دو مدل ریاضی برای حل مسئله ارائه شده

است و همچنین اثبات شده است که مسئله زمان‌بندی نت پیشگیرانه یک مسئله NP-hard است. در بخش دوم چهار الگوریتم ابتکاری حریصانه^۶ جهت حل سریع تر مدل ارائه شده است. این پژوهش مبنایی بر مطالعات آتی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

یکی از این مطالعات، مقاله ماسدو و همکاران در سال ۲۰۱۷ [Macedo et al. 2017] است که با هدف زمان‌بندی عملیات نت در شرایط محدود بودن منابع انجام شده است. خدمه یا تیم‌های کاری در این پژوهش به‌عنوان منابع محدود فرض شده است.

در مقاله خلولی و همکاران [Khalouli, Benmansour and Hanafi, 2016] از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان جهت زمان‌بندی فعالیت‌های نت پیشگیرانه استفاده شده است. محور اصلی این پژوهش مدل ریاضی مطرح شده در [Budai, Huisman and Dekker, 2006] است.

در مقاله کیم و همکاران [Kim et al. 2016] مسئله زمان‌بندی عملیات نت با در نظر گرفتن محدودیت‌های محیطی موردبررسی قرار گرفته است. جهت پیدا کردن جواب بهینه از الگوریتم باینری کلونی زنبورهای مصنوعی^۷ و جستجوی هارمونی باینری^۸ استفاده شده است. در این مقاله، یک مدل ریاضی باینری ارائه شده که هدف آن حداکثر نمودن انجام فعالیت‌های تعیین شده است.

در مقاله چئونگ و همکاران [Cheung et al. 1999] نیز خطوط راه‌آهن به‌عنوان منبع به فعالیت‌های نگهداری و تعمیر (در مترو) تخصیص یافته است. این کار با هدف انجام هر چه بیشتر فعالیت‌های نگهداری و تعمیر با اولویت بالاتر و عدم نقض هیچ‌یک از محدودیت‌ها انجام می‌شود.

در پایان‌نامه [Shamaeezadeh, 2017]، مسئله زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه ریلی در فعالیت‌های نت راه‌آهن ج.ا.ا. در شرایط قطعی موردبررسی قرار گرفته است. برای این منظور

یک مدل فضا-زمانی ارائه شده است که برگرفته از [Peng et al. 2011] است. تابع هدف مدل ریاضی ارائه شده، حداقل کردن هزینه کل است. این هزینه شامل دو بخش اصلی هزینه سیر و هزینه جریمه است. هزینه جریمه شامل هزینه ناقص انجام شدن پروژه‌ها، انجام نشدن فعالیت‌ها، بیکار ماندن بخشی از قابلیت‌های ماشین چندمنظوره در یک پروژه، هزینه‌های مرتبط با اولویت‌بندی ماشین‌ها و هزینه‌های مربوط به اولویت‌های راه‌آهن در استفاده از ماشین‌آلات است. محدودیت‌های مدل شامل محدودیت هم‌زمانی انجام فعالیت‌های یک پروژه، رعایت روابط پیش‌نیازی، محدودیت‌های مرتبط با ماشین‌آلات چندمنظوره، کاهش تعداد پروژه‌های ناقص، محدودیت تعادل شبکه و محدودیت‌های مرتبط با اولویت‌های راه‌آهن در استفاده از ماشین‌آلات است. در نهایت مدل ارائه شده توسط داده‌ها و فرآیندهای واقعی مورد استفاده در راه‌آهن ج.ا.ا. حل گردیده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل ارائه شده می‌تواند حجم مناسبی از پروژه‌های از پیش تعریف شده راه‌آهن ج.ا.ا. را زمان‌بندی کند.

۳. فرآیند برنامه‌ریزی در راه‌آهن ج.ا.ا.

برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه در راه‌آهن ج.ا.ا. شامل دو گام اصلی است. برنامه‌ریزی عملیات نت که در آن فعالیت‌های لازم‌الاجرا مشخص می‌شود و برنامه‌ریزی ماشین‌آلات مکانیزه که برنامه نهایی اجرایی را تعیین می‌کند. در ادامه به بررسی هر یک از این دو گام پرداخته می‌شود.

۳-۱ برنامه‌ریزی عملیات نت

در این قسمت، تمام فعالیت‌های لازم جهت بهبود شرایط خط و تعمیر خرابی‌های شناسایی شده از بازرسی‌های انجام شده در قالب پروژه تعریف می‌شود. بنابراین یک پروژه شامل چند فعالیت مشخص است. فعالیت‌ها را می‌توان به دو دسته اساسی

و غیراساسی تقسیم کرد. فعالیت‌های اساسی مهم‌ترین فعالیت‌های یک پروژه هستند و انجام پروژه مستلزم انجام این فعالیت‌ها است. فعالیت‌های غیراساسی، از اولویت کمتری برخوردار بوده و تنها در صورتی می‌توانند انجام شوند که فعالیت‌های اساسی پروژه در آن مقطع خط انجام شده باشد. انجام این فعالیت‌ها ضروری نیست اما در صورت عدم انجام کیفیت انجام پروژه پایین خواهد آمد که در مواردی اجتناب ناپذیر است. هر فعالیت دارای نوع مشخصی است و یک یا چند نوع ماشین متناظر با نوع فعالیت می‌تواند آن را انجام دهد (برای مثال زیرکوب برای فعالیت زیرکوبی یا سرند برای فعالیت سرند). به عبارت دیگر هر ماشین هم از نوع خاصی است که تنها در نوع فعالیت مشخصی قابل استفاده است. در این بین ماشین‌های چندمنظوره نیز در راه‌آهن ج.ا.ا. استفاده می‌شوند که شامل چند قابلیت بوده و چند نوع فعالیت را می‌توانند هم‌زمان انجام دهند (برای مثال یک ماشین چندمنظوره شامل چهار قابلیت زیرکوبی، سوزنکوبی، خط‌آرایی و جرثقیل است). ماشین‌آلات خود به دو دسته ماشین‌آلات مرکز و نواحی تقسیم می‌شوند. ماشین‌آلات نواحی در مالکیت نواحی راه‌آهن قرار دارند و معمولاً محدودیت‌هایی در استفاده در نواحی دیگر دارند. سایر ماشین‌آلات یعنی ماشین‌های مرکز، در مالکیت نواحی نبوده و محدودیت‌های کمتری در استفاده در سراسر شبکه دارند.

از طرفی، هر پروژه متعلق به یکی از نواحی راه‌آهن است. در بسیاری از این پروژه‌ها، امکان استفاده از ماشین‌آلاتی که متعلق به نواحی غیرهمجوار با ناحیه پروژه هستند، وجود ندارد. همچنین برای برخی از ماشین‌های خاص، ممکن است ماشین تنها بتواند در یک نوع پروژه خاص یا تنها در چند ناحیه خاص فعالیت کند. تمام این محدودیت‌ها، پروژه‌ها، فعالیت‌های تعریف شده، ماشین‌آلات و مشخصات آنها ورودی گام بعدی برنامه‌ریزی یعنی زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه هستند.

۲-۳ برنامه‌ریزی ماشین‌آلات مکانیزه

برنامه‌ریزی ماشین‌آلات مکانیزه برنامه‌ریزی عملیات نت را به عنوان ورودی دریافت می‌کند. در این مرحله تمام الزامات موردنظر نیز مشخص شده است. این الزامات را می‌توان در موارد زیر دسته‌بندی کرد:

- **هم‌زمانی انجام فعالیت‌های یک پروژه:** در هر پروژه لازم است که فعالیت‌ها به‌صورت هم‌زمان انجام شود. یعنی زمان شروع و پایان تمام فعالیت‌های یک پروژه باید یکسان باشد.
- **رعایت پیش‌نیازی بین پروژه‌ها:** ممکن است روابط پیش‌نیازی بین پروژه‌ها تعریف شود که این روابط باید در هنگام زمان‌بندی مدنظر قرار داده شود. برای مثال ممکن است یک پروژه جوشکاری تنها بتواند پس از حداقل مدت‌زمان معینی از شروع یک پروژه بهسازی در همان بلاک آغاز شود.
- **رعایت مسدودی پروژه‌ها:** به ازای برخی از پروژه‌ها (عموماً پروژه‌های تعمیرات خط) یک بازه مسدودی تعریف می‌شود که پروژه تنها مجاز است در این بازه زمان‌بندی شود. گاهی مسدودی به ازای بلاک تعریف می‌شود. اگر پروژه مسدودی نداشته باشد، امکان زمان‌بندی آن در کل افق زمان‌بندی وجود دارد.
- **رعایت نواحی مجاز هر ماشین:** برای هر ماشین، نواحی مجاز جهت انجام فعالیت از قبل مشخص شده است و ماشین نباید در ناحیه غیرمجاز زمان‌بندی شود.
- **رعایت ماشین‌آلات خاص:** برای برخی از فعالیت‌ها ممکن است فقط امکان استفاده از چند ماشین خاص وجود داشته باشد. بنابراین نباید ماشینی خارج از لیست به فعالیت تخصیص داده شود. حتی اگر نوع ماشین، متناظر با نوع فعالیت باشد.

• رعایت اولویت استفاده از نوع ماشین در فعالیت:

برای برخی از فعالیت‌ها مانند زیرکوب، چند نوع ماشین قابل‌استفاده وجود دارد اما اولویت استفاده از ماشین‌ها متفاوت است. برای مثال در یک پروژه دارای سوزنکوبی، استفاده از ماشین چندمنظوره در اولویت است اما استفاده از آن در سایر موارد در اولویت آخر است. این اولویت‌ها که متعدد نیز هستند باید در هنگام زمان‌بندی لحاظ شوند.

• زمان‌بندی فعالیت سرند تنها توسط یک ماشین:

یک پروژه معمولاً در چند بلاک تعریف شده است. در همه این فعالیت‌ها غیر از فعالیت سرند، این امکان وجود دارد که یک ماشین بخشی از بلاک‌ها و ماشین‌های دیگری بقیه بلاک‌های پروژه رو انجام دهد. اما در فعالیت سرند هر ماشینی که برنامه‌ریزی می‌شود، باید تا انتهای پروژه تغییر نکند و تخصیص چند ماشین سرند در یک فعالیت مجاز ناست.

• رعایت محدودیت‌های گروه‌بندی ماشین‌ها: برخی

از ماشین‌ها تنها زمانی می‌توانند به یک پروژه تخصیص پیدا کنند که ماشین مشخص دیگری در آن پروژه زمان‌بندی شده باشد. در غیر این صورت حتی با داشتن زمان آزاد برای انجام فعالیت، ماشین مذکور نمی‌تواند در پروژه استفاده شود. این محدودیت معمولاً برای ماشین‌های پایدارساز مطرح است.

• رعایت افق زمانی: تمام پروژه‌ها برای یک سال

تعریف می‌شوند. در سال بعد ممکن است در صورت عدم انجام یا زمان‌بندی دوباره در لیست قرار گیرند یا بر اساس بازرسی‌ها بروز شوند. واحد زمانی نیز «روز» در نظر گرفته شده است.

واضح است که رعایت تمامی موارد فوق‌الذکر در هنگام زمان‌بندی ضروری است و نقض هرکدام از آنها سبب تهیه یک

برنامه غیرقابل قبول خواهد شد. این موارد در مطالعات انجام شده در این حوزه تاکنون با این تنوع مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، زیرا مسئله مهم در این مطالعات حجم زیاد پروژه‌هاست اما در راه‌آهن ج.ا.ا. تنوع محدودیت‌ها مسئله اصلی است. هرکدام از این محدودیت‌ها سبب پیچیدگی زمان‌بندی می‌شود و اعمال آنها در یک مدل ریاضی کار آسانی نخواهد بود و منجر به تولید مدلی پیچیده با ابعاد بزرگ خواهد شد. خصوصاً در صورت تغییر یک یا چند مورد یا اضافه شدن موارد جدید، اصلاح مدل بسیار زمان‌بر و مشکل خواهد بود. بنابراین طراحی یک الگوریتم ابتکاری که تمامی الزامات موردنظر را شامل شود، می‌تواند مشکلات مطرح شده را تا حد زیادی مرتفع کند و امکان اصلاحات بعدی را نیز ایجاد نماید.

۴. الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

روش‌های حل مسائل برنامه‌ریزی را می‌توان به دو دسته روش‌های دقیق و تقریبی تقسیم کرد. روش‌های دقیق، روش‌هایی هستند که جواب‌های بهینه مسائل را پیدا می‌کنند و بهینگی آن نیز تضمین شده است اما برای مسائل با ابعاد بزرگ، معمولاً دارای زمان حل زیادی بوده و گاهی استفاده از آنها به‌صرفه نیست. بدین منظور از روش‌های تقریبی استفاده می‌شود. روش‌های تقریبی، روش‌هایی هستند که در یک مدت زمان معقول، جواب‌هایی باکیفیت بالا تولید می‌کنند اما بهینگی آنها تضمین شده نیست. روش‌های ابتکاری^۹ و فراابتکاری^{۱۰} در دسته روش‌های تقریبی قرار می‌گیرند. یک روش ابتکاری عموماً مجموعه از قواعد است که مختص یک مسئله خاص طراحی می‌شود [Yaghini and Akhavan, 2014]. در ادامه به معرفی الگوریتم ابتکاری طراحی شده برای برنامه‌ریزی ماشین‌آلات مکانیزه راه‌آهن ج.ا.ا. پرداخته می‌شود.

۴-۱ معرفی نمادهای استفاده شده

Plan : برنامه اجرایی عملیات نت که شامل مشخصات اجرایی فعالیت‌های زمان‌بندی شده است. این مشخصات شامل پروژه، فعالیت، بلاک، ماشین و تاریخ شروع و پایان تخصیص یافته است.

Travels : مجموعه کل سیرهای تعریف شده برای تمام ماشین‌آلات که برای اجرای برنامه زمان‌بندی لازم هستند. مجموعه‌های **Plan** و **Travels** جواب و خروجی نهایی الگوریتم ابتکاری هستند.

P : مجموعه پروژه‌های نت خطوط راه‌آهن که شامل سه گروه پروژه بهسازی، بازسازی و نگهداری است. هر عضو این مجموعه که با نماد **p** نمایش داده می‌شود، شامل مجموعه‌ای از بلاک‌ها و فعالیت‌های مشخص است که باید در همه بلاک‌های پروژه انجام شوند. اولویت‌بندی پروژه‌ها در هر گروه براساس اولویت ناحیه پروژه مشخص می‌شود. در پروژه‌های دارای اولویت یکسان، پروژه‌ها به ترتیب روز شروع مسدودی زمان‌بندی می‌شوند.

A : مجموعه کل فعالیت‌های موردنیاز که در قالب پروژه‌های مشخص تعریف شده‌اند. هر یک از اعضای این مجموعه که با **a** نشان داده شده است، دارای نوع خاصی بوده و اساسی یا غیراساسی بودن آن نیز با نظر کارشناس مربوطه مشخص است. در هر پروژه از هر نوع فعالیت حداکثر یکبار تعریف می‌شود. ممکن است تعداد دفعات استفاده از ماشین در آن فعالیت بیش از یک بار باشد که این موضوع در محاسبه سرعت انجام فعالیت توسط نوع ماشین مربوطه لحاظ می‌شود.

M : مجموعه کل ماشین‌آلات در دسترس جهت تخصیص به فعالیت‌ها. هر یک از اعضای این مجموعه که با نماد **m** نشان داده می‌شود، دارای نوع خاصی بوده و تنها مجاز به انجام یک نوع فعالیت خاص است.

B : مجموعه بلاک‌های ذکر شده در تمام پروژه‌های تعریف شده. هر یک از اعضای این مجموعه با نماد **blk** نمایش داده می‌شود. جهت سهولت زمان‌بندی و انجام حجم بیشتری از

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

پروژه‌ها، زمان‌بندی در بلاک‌ها و نه در کل طول فعالیت‌ها انجام می‌شود.

$PlannedActblk$: مجموعه فعالیت‌های زمان‌بندی شده در بلاک blk .

$AvailableDays_m$: مجموعه روزهای در دسترس ماشین m . یک ماشین تنها می‌تواند در روزهای باقیمانده در این مجموعه در یک فعالیت زمان‌بندی شود. در دو صورت یک روز از مجموعه روزهای در دسترس یک ماشین خارج می‌گردد: (۱) در صورت تخصیص ماشین به یک فعالیت که حین اجرای الگوریتم اتفاق می‌افتد. (۲) به علت مواردی مانند مرخصی اپراتورها یا تعمیرات اساسی ماشین‌ها در سال که جزء ورودی‌های الگوریتم است و از همان ابتدا از مجموعه خارج می‌شود.

$Priorities$: ماشین‌ها را بر اساس مالکیت و ناحیه در هنگام زمان‌بندی پروژه p می‌توان به شش دسته تقسیم کرد که به ترتیب اولویت شامل: (۱) ماشین‌های هم ناحیه با پروژه p ، (۲) ماشین‌های مرکز حاضر در ناحیه پروژه p ، (۳) ماشین‌های مرکز حاضر در نواحی هم‌جوار پروژه p ، (۴) ماشین‌های نواحی هم‌جوار پروژه p ، (۵) ماشین‌های مرکز حاضر در نواحی غیر هم‌جوار پروژه p و (۶) ماشین‌های نواحی غیر هم‌جوار پروژه p است. هر یک از این شش مجموعه با نماد $priority$ نشان داده می‌شود. در موارد خاص ممکن است ترتیب اولویت‌ها تغییر کند.

$RefActivity_p$: فعالیت مرجع پروژه p . از آنجا که هر پروژه شامل تعدادی فعالیت است، برای زمان‌بندی همزمان تمام فعالیت‌ها، لازم می‌شود که ترکیب تمام حالات مختلف فعالیت‌ها و ماشین‌های مجاز آنها پیدا شود. این کار برنامه‌ریزی را بسیار پیچیده می‌کند. از طرفی معمولاً یک فعالیت بسیار کندتر از سایر فعالیت‌ها انجام می‌شود. بنابراین بهتر است این فعالیت به عنوان فعالیت مرجع انتخاب شود. فعالیت مرجع یکی از فعالیت‌های اساسی پروژه است که در الگوریتم پیشنهادی

تعیین کننده زمان پروژه است. سایر فعالیت‌های پروژه باید هم‌زمان با این فعالیت زمان‌بندی شوند.

$allowedChoices$: مجموعه گزینه‌های موجود جهت زمان‌بندی یک فعالیت-بلاک. اعضای این مجموعه که با نماد $choice$ نشان داده شده‌اند، دارای مشخصاتی از قبیل ماشین مجاز برای تخصیص، روز شروع و پایان بازه دسترسی ماشین، محل قبلی و بعدی تخصیص ماشین، زمان سیر لازم جهت ورود به فعالیت-بلاک و خروج از آن است. محل قبلی تخصیص می‌تواند ایستگاه شروع ماشین یا آخرین بلاکی باشد که قبل از شروع بازه دسترسی، ماشین به آن تخصیص داده شده است. محل بعدی تخصیص نیز می‌تواند محل مجازی پایان عملیات ماشین یا اولین بلاکی باشد که بعد از پایان بازه دسترسی ماشین قرار است در آن کار کند.

$stPlan_{p,blk}$: زمان شروع عملیات پروژه p در بلاک blk که باید در تمام فعالیت‌ها رعایت شود.

$endPlan_{p,blk}$: زمان پایان عملیات پروژه p در بلاک blk که باید در تمام فعالیت‌ها رعایت شود.

$time_{a,blk}$: مدت زمان لازم جهت انجام فعالیت a در بلاک blk که تنها برای فعالیت مرجع محاسبه می‌شود. زمان انجام فعالیت به عوامل مختلفی نظیر سرعت عملکرد ماشین، ناحیه پروژه، فصل انجام پروژه، شرایط جغرافیای پروژه، میزان مسدودی داده شده در روز، مدت زمان لازم جهت راه‌اندازی ماشین و عوامل دیگری بستگی دارد که باید در محاسبات لحاظ شوند.

۴-۲ تشریح الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

فرآیند کلی انجام شده در الگوریتم ابتکاری در شکل (۲) تا (۶) ارائه شده است. در این قسمت به تشریح بخش‌های مختلف الگوریتم می‌پردازیم.

شرح متد اصلی در شکل (۲): ابتدا، مجموعه‌های مورد استفاده مقارن‌دهی اولیه شده (مقدار تهی) و تمام داده‌های لازم برای

زمان‌بندی خوانده می‌شود. سپس به ازای هر ماشین، مجموعه روزهای دسترسی ماشین که در ابتدای سال مشخص شده است، در مجموعه $AvailableDays_m$ قرار می‌گیرد (خط ۴ تا ۶). حال به ازای هر پروژه، فعالیت مرجع مشخص می‌شود (خط ۷-۹). این فعالیت از بین فعالیت‌های اساسی بصورت زیر در متد $selectRefActivity()$ تعریف می‌شود:

• اگر فعالیت سرند در پروژه باشد، این فعالیت به عنوان فعالیت مرجع انتخاب می‌شود.

• در غیر اینصورت، اگر پروژه دارای فعالیت سوزنکوبی باشد، این فعالیت به عنوان فعالیت مرجع انتخاب می‌شود.

• در غیر اینصورت، اگر پروژه دارای فعالیت زیرکوبی باشد، این فعالیت به عنوان فعالیت مرجع انتخاب می‌شود.

• در غیر اینصورت، اولین فعالیت اساسی به عنوان فعالیت مرجع انتخاب می‌شود.

شرح متد اول در شکل (۳): این متد هم برای پروژه‌های تعمیر قابل استفاده است و هم برای پروژه‌های نگهداری. فرآیند نمایش داده شده مخصوص پروژه‌های تعمیرات است و در خصوص پروژه‌های نگهداری در خط سوم باید 'Maintenance' جایگزین 'Repair' شود.

ابتدا به ازای هر یک از شش اولویت مورد نظر در خصوص ناحیه و مالکیت ماشین ($Priorities$)، و به ازای هر بلاک پروژه، به ترتیب فعالیت مرجع، سایر فعالیت‌های اساسی و در نهایت فعالیت‌های غیراساسی پروژه در صورت عدم تخصیص تا حد ممکن زمان‌بندی می‌شوند. اگر پروژه-بلاک مورد بررسی دارای یک پروژه-بلاک پیش‌نیاز باشد، تنها در صورتی می‌تواند وارد زمان‌بندی شود که فعالیت‌های اساسی پروژه-بلاک پیش‌نیاز تاکنون زمان‌بندی شده باشند (خط ۶). اگر فعالیت مرجع تاکنون در بلاک زمان‌بندی نشده باشد، سایر فعالیت‌های بلاک هم امکان برنامه‌ریزی ندارند. فعالیت‌های غیراساسی نیز زمانی می‌توانند مورد بررسی قرار بگیرند که تمام فعالیت‌های اساسی پروژه-بلاک زمان‌بندی شده باشند (خط ۱۶-۲۲).

در زمان‌بندی هر فعالیت-بلاک باید چک شود که قبلاً برنامه‌ریزی نشده باشد. در غیر اینصورت ممکن است یک تخصیص جدید تعریف شود که خطاست. این فرآیند تا بررسی تمام اولویت‌ها ادامه می‌یابد و در پایان حداکثر تخصیص ممکن در گروه پروژه مورد بررسی برگردانده می‌شود.

Heuristic Algorithm – Main Method

```

1. procedure main()
2.   Plan ← ∅; PlannedActblk ← ∅; Travels ← ∅;
3.   readInitialData();
4.   for each machine (m) do
5.     AvailableDaysm ← all days in year except
       'Unavailable' days
6.   end-for
7.   for each project (p) do
8.     RefActivityp ← selectRefActivity(p);
9.   end-for
10.  planRepairProjects();
11.  planMaintenanceProjects();
12.  planStabilizationActivities();
13.  return Plan, Travels;
14. end-procedure
    
```

شکل ۲. شبه کد متد اصلی در الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

به دلیل اهمیت بالای پروژه‌های تعمیرات (بهسازی و بازسازی) نسبت به پروژه‌های نگهداری ابتدا این پروژه‌ها در خط ۱۰

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

useOtherMultifunctionAbility() باید چک شود که آیا می‌توان از سایر قابلیت‌های ماشین چندمنظوره در این فعالیت استفاده کرد؟ برای تشخیص قابلیت‌های یک ماشین چندمنظوره هنگام اجرای الگوریتم، به ازای هر قابلیت آن یک ماشین مجازی با نوع مورد نظر تعریف شده است. در صورت وجود قابلیت مورد نظر، ماشین چندمنظوره مدنظر به فعالیت-بلاک در زمان برنامه‌ریزی شده تخصیص داده شده و "true" برگردانده می‌شود (خط ۷).

شرح متد دوم در شکل (۴): روند کلی این متد کاملاً شبیه به متد اول است. با این تفاوت که تنها روی فعالیت‌های پایدارسازی پروژه‌ها انجام می‌شود.

شرح متد سوم در شکل (۵): هدف کلی این متد زمان‌بندی فعالیت-بلاک ورودی و تخصیص یک ماشین مناسب به آن است. ابتدا بررسی می‌شود که آیا یک ماشین چندمنظوره در فعالیت دیگری در بلاک زمان‌بندی شده است یا خیر (خط ۳). اگر جواب مثبت باشد، در متد

Heuristic Algorithm – Method 1	
1.	procedure planRepairProjects ()
2.	for each priority in Priorities do
3.	for each 'Repair' project (<i>p</i>) do
4.	for each block of project (<i>blk</i>) do
5.	if ((<i>p</i> - <i>blk</i> has no 'Prerequisite' project-block) or (<i>p</i> has a 'Prerequisite' project-block that was scheduled)) then
6.	if (RefActivity _{<i>p</i>} is not in PlannedAct _{<i>blk</i>}) then
7.	plan, Travels ← scheduleActivity(<i>p</i> , RefActivity _{<i>p</i>} , <i>blk</i> , priority);
8.	end-if
9.	if (RefActivity _{<i>p</i>} is in PlannedAct _{<i>blk</i>}) then
10.	for each 'Basic' activity (<i>a</i>) of project except RefActivity _{<i>p</i>} do
11.	if (<i>a</i> is not in PlannedAct _{<i>blk</i>}) then
12.	plan, Travels ← scheduleActivity(<i>p</i> , <i>a</i> , <i>blk</i> , priority);
13.	end-if
14.	end-for
15.	end-if
16.	if (All 'Basic' activities of project are in PlannedAct _{<i>blk</i>}) then
17.	for each 'Non-Basic' activity (<i>a</i>) of project except 'Stabilization' activities do
18.	if (<i>a</i> is not in PlannedAct _{<i>blk</i>}) then
19.	plan, Travels ← scheduleActivity(<i>p</i> , <i>a</i> , <i>blk</i> , priority);
20.	end-if
21.	end-for
22.	end-if
23.	end-if
24.	end-for
25.	end-for
26.	end-for
27.	return Plan, Travels ;
28.	end-procedure

شکل ۳. شبه کد متد اول در الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

نداشته باشند (*isAssigned* مقدار "false" داشته باشد)، اولین گزینه موجود انتخاب شده و به فعالیت-بلاک تخصیص داده می شود (خط ۱۶-۱۹).

اگر فعالیت هنوز زمان بندی نشده باشد (*isAssigned* مقدار "false" داشته باشد)، باید لیست تمام گزینه های موجود جهت زمان بندی فعالیت-بلاک باتوجه به *priority* تهیه شود. لیست گزینه های موجود در متد *findAllAllowedChoices()* تهیه می شود (خط ۷). ابتدا لیست تمام ماشین های مجاز برای عملیات در فعالیت باتوجه به فعالیت، نوع و ناحیه آن مشخص می شود. هر یک از ماشین هایی که دارای یک ماشین پیش نیاز هستند (محدودیت گروه بندی ماشین ها)، در صورت عدم زمان بندی ماشین پیش نیاز در بلاک، از لیست حذف می شوند. سپس به ازای هر ماشین، تمام بازه های پیوسته دسترسی ماشین استخراج می شود. در بین این بازه ها، بازه هایی که طول کوچکتری نسبت به زمان فعالیت-بلاک دارند (با رعایت زمان پیش نیازی در صورت وجود)، یا مسدودی پروژه-بلاک را رعایت نمی کنند و یا محل حضور قبلی یا بعدی ماشین، اجازه عملیات ماشین در محل بلاک را نمی دهد، از لیست حذف می شوند. لیست نهایی در قالب *allowedChoices* برگردانه می شود. این لیست باید براساس فاصله، مرتب گردد (خط ۸). منظور از فاصله، مجموع فاصله بین محل قبلی تا بلاک و بلاک تا محل بعدی تخصیص ماشین است. حال به ازای هر *choice*، اگر ماشین این گزینه، دارای اولویت مدنظر در مورد نوع فعالیت باشد، در متد *assignMachine()* به فعالیت-بلاک تخصیص داده شده و حلقه به پایان می رسد (خط ۹-۱۵). اگر هیچ یک از ماشین های موجود در گزینه ها، در اولویت های نوع فعالیت قرار

Heuristic Algorithm – Method 2	
1.	procedure planStabilizationActivities ()
2.	for each priority in Priorities do
3.	for each project (<i>p</i>) do
4.	for each block of project (<i>blk</i>) do
5.	for each 'Stabilization' activity (<i>a</i>) of project do
6.	if (<i>a</i> is not in <i>PlannedAct_{blk}</i>) then
	$plan, Travels \leftarrow$
7.	scheduleActivity(<i>p</i> , <i>a</i> , <i>blk</i> , <i>priority</i>);
8.	end-if
9.	end-for
10.	end-for
11.	end-for
12.	end-for
13.	return Plan, Travels ;
14.	end-procedure

شکل ۴. شبه کد متد دوم در الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

Heuristic Algorithm – Method 3	
1.	procedure scheduleActivity(<i>project</i> , <i>act</i> , <i>block</i> , <i>priority</i>)
2.	<i>isAssigned</i> $\leftarrow$ "false";
3.	if (a 'Multifunction' machine is assigned to <i>project</i>) then
4.	<i>isAssigned</i> $\leftarrow$ useOtherMultifunctionAbility();
5.	end-if
6.	if (<i>isAssigned</i> is "false") then
7.	<i>allowedChoices</i> $\leftarrow$ findAllAllowedChoices (<i>act</i> , <i>block</i> , <i>priority</i>);
8.	<i>allowedChoices</i> $\leftarrow$ sort <i>allowedChoices</i> based on distances;
9.	for each choice in <i>allowedChoices</i> do

```

10.      if (machine of choice has 'Desired Requirements' for act) then
11.          assignMachine(project, act, block, choice);
12.          isAssigned ← "true";
13.          exit loop;
14.      end-if
15.  end- for
16.      if (isAssigned is "false") then
17.          select first choice in allowedChoices;
18.          assignMachine(project, act, block, choice);
19.      end- if
20.  end- if
21.  return Plan, Travels ;
22. end-procedure
    
```

شکل ۵. شبه کد متد سوم در الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

```

9.      add act to PlannedActblock ;
10.     add assigned act-block to Plan ;
11.     update Travels ; //update last travels or
        define new travels from and to act.
12.     return Plan, Travels ;
13. end-procedure
    
```

شکل ۶. شبه کد متد چهارم در الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

تاریخ‌های تعیین شده باید از روزهای در دسترس ماشین خارج گردد تا دوباره مورد استفاده قرار نگیرد. فعالیت در مجموعه $PlannedAct_{block}$ و فعالیت-بلاک زمان‌بندی شده در $Plan$ وارد می‌شود. بنابراین یک $Plan$ بصورت لیستی از تخصیص‌ها تعریف می‌شود. $Travels$ نیز لیستی از سیرهای تعریف شده است. در پایان متد، سیرهای مرتبط با ماشین در بلاک قبلی و بعدی باید بروز شود. اگر از قبل سیری تعریف نشده باشد، سیر ورودی و خروجی جدید تعریف می‌شود. در غیراینصورت باید سیر قبلی حذف شده و سیرهای جدید اضافه گردند. برای مثال در شکل (۷)، پروژه-بلاک ۲ بین دو پروژه-بلاک ۱ و ۳ تعریف شده است. بنابراین باید سیر قبلی (خط چین) حذف شده و دو سیر جدید ۱ و ۲ تعریف گردند.

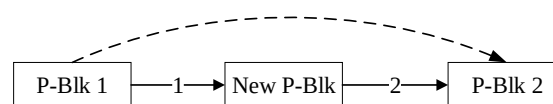
شرح متد چهارم در شکل (۶): هدف این متد تعیین مشخصات تخصیص انجام شده به فعالیت بلاک است. اگر فعالیت مورد بررسی، فعالیت مرجع باشد، قبل از تخصیص باید زمان شروع و پایان پروژه-بلاک مشخص شود. زمان شروع پروژه-بلاک برابر زمان شروع بازه گزینه ورودی بعلاوه لازم سیر از محل قبلی ماشین به بلاک است. این زمان بعلاوه زمان لازم جهت انجام فعالیت، برابر زمان پایان پروژه-بلاک (ابتدای روز بعدی) خواهد بود. از این مقدار یک واحد کم می‌شود تا تاریخ پایان پروژه-بلاک (انتهای روز) بدست آید. اگر برای پروژه-بلاک روابط پیش‌نیازی تعریف شده باشد، زمان پیش‌نیازی باید در این قسمت لحاظ شود (خط ۲-۵).

Heuristic Algorithm – Method 4

```

1.  procedure assignMachine (project, act, block,
    choice)
2.      if (act is RefActivityproject) then
3.          stPlanproject,block = stDaychoice +
            inputTravelTimechoice;
4.          endPlanproject,block = stPlanproject,block +
            timeact,block - 1;
5.      end- if
6.      set stPlanproject,block to endPlanproject,block as
            'Assigned Days' for act-block ;
7.      set machine of choice as 'Assigned Machine'
            for act-block ;
8.      remove assigned days from
            AvailableDaysmachine ;
    
```

باید دقت شود که مجموع سیر یک ماشین چندمنظوره باید تقسیم به تعداد قابلیت‌های آن شود تا سیر ماشین چندمنظوره بطور کلی حساب شود.



شکل ۷. یک مثال برای بروزرسانی سیرهای تعریف شده

۵. نتایج اجرای الگوریتم

جهت اجرای الگوریتم از داده‌های نگهداری و تعمیر راه‌آهن ج.ا.ا. در سال ۹۶ استفاده شده است. الگوریتم به زبان جاوا و در یک سیستم کامپیوتری با مشخصات حافظه RAM به میزان ۸ گیگابایت و پردازنده Core™i7-6500U با پردازش ۲/۵ گیگاهرتز پیاده‌سازی شده است. برای آنکه قابلیت الگوریتم بهتر دیده شود، نتایج الگوریتم در مقایسه با برنامه تهیه شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا. در سال ۹۶، در جدول (۱) آورده شده است.

همانطور که در جدول دیده می‌شود، کیلومتر اژ اساسی برنامه‌ریزی شده در هر سه گروه پروژه، افزایش چشمگیری داشته است. این افزایش در پروژه‌های بهسازی و بازسازی بسیار بیشتر بوده است. بطور کلی ۱۴/۸۰ درصد افزایش در حجم مورد برنامه‌ریزی اتفاق افتاده است. از مهم‌ترین دلایل این تغییر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم توجه بر برخی فعالیت‌های خاص: در برنامه تهیه توسط راه‌آهن ج.ا.ا. برخی از فعالیت‌ها نظیر حمل ادوات و ریل و لایروبی، حمل بالاست مستعمل و پروژه‌هایی مانند تراش ریل و جوش درز ریل هنگام برنامه‌ریزی دیده نشده و برنامه‌ریزی نمی‌شوند.
- عدم استفاده از کامپیوتر: از آنجا که برنامه بصورت چشمی و بدون استفاده از کامپیوتر تهیه می‌شود، بسیاری از حالات مختلف دیده نشده و امکان پیدا کردن برنامه بهتر و یا انجام تخصیص بیشتر وجود ندارد.

در این الگوریتم، سیرهای ورودی بلافاصله قبل از شروع عملیات بلاک زمان‌بندی می‌شوند. بنابراین سیرهای خروجی که ورودی به یک بلاک دیگر نیز هستند، ممکن است پس از اتمام عملیات بلاک انجام نشود. شروع عملیات هر ماشین از ایستگاه مبدأ ماشین و اتمام آن در یک ایستگاه مجازی است. این ایستگاه مجازی برای همه ماشین‌ها یکسان فرض شده و زمان سیر به آن صفر است. تنها در سیر به ایستگاه مجازی، سیر خروجی بلافاصله بعد از اتمام عملیات بلاک انجام می‌شود. این نکات باید در هنگام تعریف سیرها رعایت شود.

از جمله نکات دیگری که باید در هنگام اجرای الگوریتم به آن دقت شود، زمان‌بندی فعالیت‌های سرند است. زیرا این فعالیت باید بصورت کلی و نه بلاک به بلاک زمان‌بندی شود. این موضوع سبب می‌شود فرآیند زمان‌بندی فعالیت سرند کمی متفاوت باشد. ابتدا باید لیست کل گزینه‌ها به ازای کل فعالیت ایجاد شود. بدین معنی که در هنگام بررسی گزینه‌ها باید زمان کل پروژه را لحاظ کرد. اگر بازه دسترسی ماشین برای انجام کل فعالیت بصورت یکجا کافی نباشد، از لیست گزینه‌ها حذف می‌شود. حال باید مانند سایر فعالیت‌ها، زمان‌بندی بلاک به بلاک بصورت نسبت طول بلاک از کل طول پروژه انجام شود تا بتوان سایر فعالیت‌های پروژه را براساس بلاک زمان‌بندی کرد.

بعلاوه از آنجا که یک ماشین چندمنظوره بصورت مجموعه‌ای از چند ماشین مجازی تعریف شده است، لازم است هر زمان که یک قابلیت در یک بازه زمانی به یک پروژه-بلاک تخصیص داده می‌شود، روزهای این بازه از $AvailableDays_m$ در تمام قابلیت‌ها حذف شود. همچنین برای تمام قابلیت‌ها باید سیر تعریف یا بروز شود. فقط در محاسبه کیلومتر اژ سیر ماشین‌ها،

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

فعالیت‌ها زمان‌بندی شده‌اند. این دو شاخص نیز افزایش قابل توجهی داشته است.

بطور کلی، نتایج حاصل از الگوریتم بسیار بهتر از برنامه تهیه‌شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا. بوده است. همچنین زمان اجرای الگوریتم تنها چند ثانیه است. در صورتیکه تهیه برنامه توسط راه‌آهن معمولاً چند روز به طول می‌انجامد.

کیلومتر از سیر ماشین‌آلات قابل مقایسه نیست. زیرا در تهیه برنامه بصورت دستی، این موضوع دیده و محاسبه نمی‌شود. منظور از ماشین-کیلومتر برنامه‌ریزی شده، مجموع کل کیلومتری است که به تمام ماشین‌ها در تمام فعالیت‌ها اختصاص یافته است. تعداد ماشین-روز برنامه‌ریزی شده نیز، مجموع کل روزهایی است که ماشین‌آلات برای اجرای کل

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با برنامه تهیه‌شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا.

شاخص	برنامه تهیه‌شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا.	برنامه تهیه‌شده توسط الگوریتم	درصد تغییرات
کیلومتر از برنامه‌ریزی شده بهسازی	۱۱۲/۵۰	۲۴۱/۰۰	۱۱۴/۲۲
کیلومتر از برنامه‌ریزی شده بازسازی	۱۶۶/۰۰	۲۵۶/۳۵	۵۴/۴۳
کیلومتر از برنامه‌ریزی شده نگهداری	۴۵۹۳/۰۰	۵۰۹۵/۳۰	۱۰/۹۴
کیلومتر از برنامه‌ریزی شده کل	۴۸۷۱/۵۰	۵۵۹۲/۷۰	۱۴/۸۰
درصد برنامه‌ریزی شده از کل	۷۷/۵۴	۸۹/۰۲	۱۴/۸۰
کیلومتر از سیر ماشین‌آلات	—	۱۰۷۸۶۰/۰۰	—
ماشین-کیلومتر برنامه‌ریزی شده	۹۷۶۷/۹۷	۱۲۵۳۹/۴۹	۲۸/۳۷
تعداد ماشین-روز برنامه‌ریزی شده	۱۶۳۰۸/۶۳	۱۹۵۴۵/۰۰	۱۹/۸۴

۶. شبیه‌سازی و اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

یکی از بهترین راه‌ها جهت سنجش روش ارائه شده شبیه‌سازی است. برای پیاده‌سازی یک مدل شبیه‌سازی، باید مراحل مشخصی را طی کرد. در این قسمت به ترتیب به بررسی این مراحل پرداخته می‌شود.

۶-۱ تعریف مسئله

هدف از شبیه‌سازی، بررسی نحوه اجرای یک برنامه زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه، میزان تحقق آن و شناخت مغایرت‌های احتمالی است. باتوجه به این تعریف، می‌توان عملیات نت در راه‌آهن ج.ا.ا. را به عنوان سیستم مورد بررسی در نظر گرفت. متغیر حالت، متغیری است که وضعیت سیستم را در هر لحظه از زمان نشان می‌دهد که در این مسئله می‌توان حجم عملیات انجام شده در روز در یک بلاک مشخص را متغیر حالت گرفت.

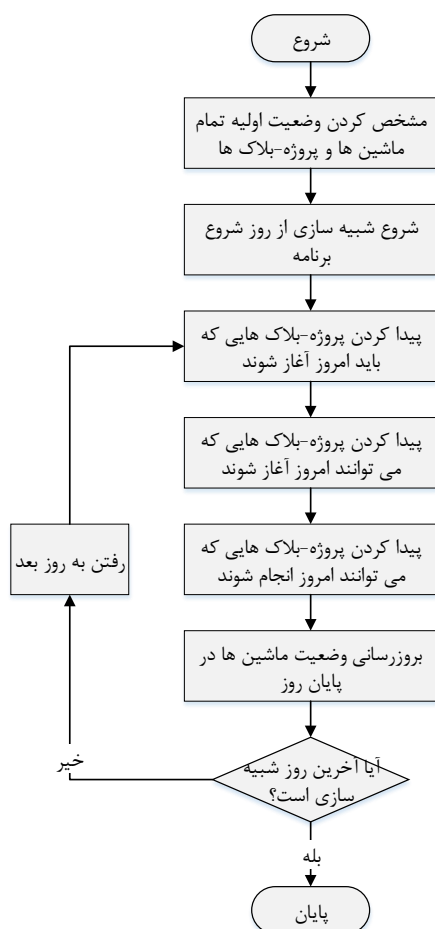
از مزایای ایجاد شده توسط روش پیشنهادی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعریف دقیق سیر ماشین‌آلات که در برنامه دستی انجام نمی‌شود.
- مشخص شدن جزئیات برنامه هر بلاک پروژه و نه فقط برنامه کل پروژه.
- افزایش دقت برنامه‌ریزی و دیده شدن حالات مختلف به دلیل استفاده از کامپیوتر.
- کاهش زمان برنامه‌ریزی در عین افزایش دقت آن.
- امکان بررسی تمام اولویت‌ها و تغییر آنها در صورت نیاز.

۳-۶ گردآوری داده‌ها

جهت اجرای شبیه‌سازی، به تمام داده‌هایی که برای اجرای الگوریتم ترکیبی استفاده شده، نیاز است. برای نزدیک کردن شبیه‌سازی به دنیای واقعی، لازم است بعضی موارد بصورت غیر قطعی لحاظ شوند. جهت تهیه داده‌های غیرقطعی از گزارش‌های ثبت شده در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ استفاده شده است. مهم‌ترین عوامل غیر قطعی، شامل موارد زیر است:

عملیات و خرابی ماشین‌ها: برای اجرای شبیه‌سازی، لازم است مشخص شود که هر ماشین بعد از آخرین تعمیر، چند روز (یا چند ساعت) کار می‌کند تا به خرابی بعدی برسد و سپس تعمیر آن چند روز طول می‌کشد. برای توزیع این شاخص‌ها، فراوانی تعداد روزهای کاری و خرابی هر ماشین جداگانه از یک تا ۳۶۵ روز محاسبه شده و سپس توزیع فراوانی آن بدست آمده است.



شکل ۸. فلوچارت فرآیند شبیه‌سازی

از آنجا که متغیر حالت روزانه تغییر می‌کند، سیستم مورد بررسی گسسته است.

۲-۶ مدل‌سازی

در این مرحله باید مدل شبیه‌سازی تهیه شود. از آنجا که برنامه برای یکسال تهیه می‌شود، مدل شبیه‌سازی هم برای یکسال طراحی شده است. جهت ساده‌سازی مدل‌سازی و قابلیت پیاده‌سازی آن، معمولاً فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود. فرضیات اولیه جهت ایجاد مدل شامل موارد زیر است:

- ✓ هیچ‌گاه عملیات بهسازی یا بازسازی لغو نمی‌شود، فقط به تأخیر می‌افتد. اجرای پروژه‌های نگهداری در صورت رسیدن به زمان پروژه‌های بهسازی یا بازسازی لغو می‌شود.
 - ✓ تنها فعالیت‌های اساسی برنامه ریزی شده در بلاک بررسی می‌شوند. (یعنی فرض شده است تنها این فعالیت‌ها ممکن است زمان عملیات را تغییر دهند).
 - ✓ عملیات بلاک در یک روز، تنها در صورتی می‌تواند انجام شود که تمام فعالیت‌های اساسی آن بلاک بتوانند انجام شوند زیرا در غیر اینصورت خط در آن روز غیرقابل استفاده است.
 - ✓ زمان مسدودی در یک روز نمی‌تواند زیر یک ساعت باشد.
 - ✓ روزی که کار یک بلاک تمام می‌شود، کار بلاک یا پروژه بعدی نمی‌تواند آغاز شود.
 - ✓ اگر طول باقیمانده از یک بلاک کمتر از ۱۰۰ متر باشد، عملیات بلاک تمام شده فرض می‌شود.
 - ✓ عملیات بلاک‌های لغو شده، دوباره مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.
 - ✓ سیر ماشین‌آلات دارای زمان قطعی است.
- پس از اعمال فرضیات، مدل نهایی بصورت فلوچارت در شکل (۸) نمایش داده شده است.

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

سرعت عملکرد ماشین‌ها: بدین معنی که هر ماشین چه مقدار (به متر) در یک ساعت مسدودی مفید، کار انجام می‌دهد. از آنجا که مقدار عملکرد یک متغیر تصادفی پیوسته است، از نرم افزار Minitab 18 برای پیدا کردن توزیع این داده استفاده شده است. همچنین چون سرعت عملکرد، وابسته به گروه پروژه نیز است، این کار به ازای هر گروه پروژه بهسازی، بازسازی و نگهداری بصورت جداگانه انجام شده و مشخصات تمام توزیع‌های لازم استخراج شده است.

عدم مسدودی: بدین معنی است که در آن تاریخ مشخص، اجازه مسدود شدن خط صادر نشده است. برای اعمال این موضوع در شبیه‌سازی، یک توزیع برنولی بدست آمده است. به این صورت که در هر روز و هر ناحیه، نرخ لغو مسدودی در هر دو سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ بدست آمده است.

زمان مسدودی داده شده: در صورتی که اجازه مسدودی داده شود، باید زمان آن مشخص شود. برای بدست آوردن توزیع

این داده، بزرگترین زمان مسدودی داده شده، پیدا شده و این فاصله به بازه‌های ۵ دقیقه‌ای تقسیم شده است. سپس فراوانی هر بازه محاسبه شده و در نهایت توزیع فراوانی آن بدست آمده است. همچنین به دلیل اینکه زمان مسدودی برای گروه بهسازی و بازسازی بیشتر از پروژه‌های نگهداری است، توزیع فراوانی هر دسته جداگانه بدست آمده است.

۶-۴ اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

جهت اعتبارسنجی مدل، از برنامه دستی تهیه شده توسط راه‌آهن ج.ا.ا. برای سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. این برنامه به عنوان ورودی شبیه‌سازی قرار داده شده و نتایج خروجی در جدول (۲) نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، در برنامه دستی، ۸۵/۶ درصد برنامه اولیه، تا پایان سال محقق شده است. در حالی که این درصد در شبیه‌سازی، ۸۸/۰۳ درصد بوده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی براساس برنامه دستی راه‌آهن

گروه پروژه	کیلومتر از برنامه ریزی شده	کیلومتر از محقق شده در واقعیت	کیلومتر از شبیه سازی شده	اختلاف
بهسازی	۱۱۲/۵	۹۷/۰۰	۱۰۹/۰	۱۲/۰۰
بازسازی	۱۶۶/۰	۱۴۸/۴۲	۱۵۷/۷	۹/۲۸
نگهداری	۴۵۹۳/۰	۳۹۲۴/۶۸	۴۰۲۱/۰	۹۷/۰۲
جمع کل	۴۸۷۱/۵	۴۱۷۰/۱۰	۴۲۸۸/۴	۱۱۸/۳
درصد از کیلومتر از برنامه ریزی شده		۸۵/۶۰	۸۸/۰۳	
درصد از کیلومتر از مورد نیاز		۶۶/۳۷	۶۸/۲۶	

بطورکلی طول شبیه‌سازی شده ۱۱۸/۳ کیلومتر بیشتر از طول محقق شده است (۲/۴۳ درصد اختلاف نسبت به میران محقق شده در واقعیت). از دلایل این اختلاف می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

✓ تغییرات مکرر برنامه نت خط: تغییر برنامه نت خط مخصوصا در مورد پروژه‌های بهسازی و بازسازی در طی سال در راه آهن ج.ا.ا. بسیار معمول است. بدین

گونه که ماشین‌ها برای انجام پروژه‌هایی که در برنامه اولیه ماشین‌آلات نبوده، اعزام می‌شوند. این موضوع سبب می‌شود درصد تحقق برنامه ابتدایی ماشین‌آلات پایین‌تر از درصد محقق شده براساس شبیه‌سازی باشد.

✓ بی‌نظمی‌های اتفاق افتاده هنگام اجرای برنامه: پس از بررسی‌های انجام شده در برنامه و گزارش‌های

ثبت شده، مشاهده گردید که در برخی موارد، ماشین استفاده شده هنگام اجرای برنامه متفاوت از ماشین برنامه ریزی شده است. این موضوع به دلیل تفاوت در سرعت عملکرد و قابلیت اطمینان ماشین‌ها، می‌تواند نتیجه خروجی را تغییر دهد.

✓ استفاده از ماشین‌های کمکی: در راه‌آهن گاهی ممکن است به دلیل خرابی یک ماشین، تا تعمیر آن ماشین، از ماشین یک پروژه دیگر استفاده شود. این مورد به دلیل احتمال وقوع کمتر و پیچیدگی پیاده‌سازی، در شبیه‌سازی لحاظ نشده است.

✓ فرضیات لحاظ شده هنگام شبیه‌سازی: این فرضیات معمولاً جهت ساده‌سازی مدل اعمال می‌شوند که تاحدی می‌تواند شبیه‌سازی را از شرایط واقعی دور کند.

۶-۵ پیاده سازی و ارائه نتایج

شبیه‌سازی به زبان جاوا و به تعداد ۱۰۰۰ بار انجام شده و میانگین نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که

دیده می‌شود، برنامه تهیه شده، بطور متوسط ۸۵/۹۱ درصد امکان تحقق دارد. مهمترین علت محقق نشدن کل برنامه، خرابی بیش از حد ماشین‌آلات و زمان تعمیرات بالای بعضی از آنها بوده است. بطور کلی می‌توان گفت که در وضعیت فعلی راه‌آهن ج.ا.ا، امکان تحقق تمام پروژه‌های برنامه‌ریزی شده بهسازی و بازسازی وجود ندارد و از قابلیت بسیار پایین‌تری نسبت به انجام پروژه‌های نگهداری برخوردار است. این درحالی است که اهمیت پروژه‌های بهسازی و بازسازی بسیار بیشتر است.

برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از الگوریتم با برنامه دستی راه‌آهن، لازم است اعداد به دست آمده با یک عدد واحد مقایسه گردد. در برنامه راه‌آهن ۶۶/۳۷ درصد از کیلومترهای مورد نیاز کل محقق شده اما در برنامه حاصل از الگوریتم بطور میانگین ۷۶/۴۹ درصد از همین مقدار محقق شده و ۱۰/۱۲ درصد بهبود داشته است. این موضوع در کنار سایر مزیت‌های الگوریتم قابلیت بالای الگوریتم را در شرایط واقعی نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برنامه تهیه شده توسط الگوریتم پیشنهادی

گروه پروژه	کیلومترهای مورد نیاز	متوسط کیلومتر برنامه‌ریزی شده توسط الگوریتم پیشنهادی	متوسط کیلومتر محقق شده براساس شبیه سازی	درصد تحقق برنامه با شبیه سازی
بهسازی	۲۵۴/۰۰	۲۴۱/۰۰	۱۲۲/۸۶	۵۰/۹۷
بازسازی	۳۲۴/۷۱	۲۵۶/۳۵	۱۵۳/۵۲	۵۹/۸۸
نگهداری	۵۷۰۳/۸۶	۵۰۹۵/۳۰	۴۵۲۸/۹۹	۸۸/۸۸
جمع کل	۶۲۸۲/۵۸	۵۵۹۲/۷۰	۴۸۰۵/۳۷	۸۵/۹۱
درصد از کیلومترهای مورد نیاز				۷۶/۴۹

۷. جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

زمان‌بندی عملیات نگهداری و تعمیر خطوط ریلی، تاکنون بصورت دستی و متکی به دانش و تجربه کارشناسان این حوزه بوده است. این کار معمولاً زمان زیادی از کارشناسان می‌گیرد ولی در عمل بسیاری از محدودیت‌های مدنظر در زمان‌بندی دیده نمی‌شود. از سوی دیگر با توجه به تغییرات مکرر برنامه نت خط در راه‌آهن ج.ا.ا. در طی سال، نیاز به برنامه‌ریزی چندین باره ماشین‌آلات مکانیزه ریلی وجود دارد که به علت زمانبر بودن برنامه‌ریزی دستی، برنامه‌ریزی مجدد به صورت کامل انجام نمی‌گیرد. همچنین در مرور ادبیات موضوع دیده شد که مسئله زمان‌بندی عملیات تعمیرات و نگهداری، یک مسئله NP-hard است. بنابراین ارائه یک روش قابل قبول که در یک مدت زمان معقول به حل مسئله پردازد، می‌تواند بسیار مفید باشد.

در زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه در راه‌آهن ج.ا.ا.، اولویت‌ها و محدودیت‌های بسیاری وجود دارد که کار زمان‌بندی را بسیار پیچیده می‌کند. این محدودیت‌ها شامل همزمانی اجرای فعالیت‌های یک پروژه، رعایت پیش‌نیازی بین پروژه‌ها، رعایت مسدودی پروژه‌ها و اولویت‌های گوناگون در استفاده از ماشین‌آلات است. جهت در نظر گرفتن تمام این موارد و ارائه یک برنامه کارآمد در این مقاله یک روش حل ابتکاری ارائه شد. نتایج اجرای الگوریتم توسط داده‌های نگهداری و تعمیر راه‌آهن ج.ا.ا. در سال ۹۶ نشان می‌دهد که روش حل ارائه شده توانایی بالایی در برنامه‌ریزی ماشین‌آلات مکانیزه، با در نظر گرفتن تمام الزامات و محدودیت‌ها دارد.

جهت اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی و شناخت تأثیر شرایط واقعی در اجرای خروجی برنامه، یک مدل شبیه‌سازی ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که قابلیت راه‌آهن ج.ا.ا. با شرایط کنونی در اجرای پروژه‌های بهسازی و بازسازی کمتر از حد قابل انتظار است. برای بهبود شرایط فعلی، لازم است اصلاحاتی در برنامه نگهداری و تعمیر ماشین‌آلات، نحوه

پیاده‌سازی برنامه تهیه شده و سیاست‌های اعمال شده صورت گیرد.

در این مقاله، مسئله زمان‌بندی ماشین‌آلات مکانیزه بصورت قطعی مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود روش حل ارائه شده می‌توان از رویکردهای غیرقطعی مانند بهینه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای نیز بهره برد. همچنین می‌توان از روش‌های فراابتکاری جهت بهبود فرآیند روش ابتکاری استفاده کرد. در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص گردید که خرابی و تعمیرات ماشین‌آلات بسیار در اجرای برنامه تهیه شده مؤثر بوده و اخلاص زیادی در آن ایجاد می‌کند. در مطالعات آینده می‌توان قابلیت اطمینان ماشین‌ها و خرابی آنها را در فاز زمان‌بندی در نظر گرفت تا استواری برنامه بهبود یابد.

۸. پی‌نوشت‌ها

- 1- Preventive Maintenance
- 2- Projects Clustering
- 3- Time-Space Network (TSN)
- 4- Mutual Exclusion (MX) constraints
- 5- Corridors
- 6- Greedy
- 7- Binary Artificial Bee Colony (BABC)
- 8- Binary Harmony Search (BHS)
- 9- Heuristic
- 10- Meta-Heuristic

۹. مراجع

- اعتبارات عمرانی برگرفته از سالنامه آماری راه‌آهن، سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶.

- ذاکری، جبارعلی و رضازاده، مهرداد (۱۳۸۵) "روش‌های نگهداری خط آهن"، تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

-Khalouli, S., Benmansour, R. and Hanafi, S. (2016) "An ant colony algorithm based on opportunities for scheduling the preventive railway maintenance", presented at 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 594-599.

-Kim, K.-D., Kim, S.-S., Nam, D.-H. and Jeong, H. (2016) "Railway track maintenance scheduling using artificial bee colony and harmony search", Journal of Sensor Science and Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 91-102.

-Li, G., Balakrishnan, A. and Roth, B. (2009) "Effectively solving production gang scheduling problem for railway track maintenance projects," presented at the INFORMS Annual Meeting, San Diego, United States.

-Lidén, T. (2015) "Railway infrastructure maintenance - A Survey of Planning Problems and Conducted Research", Transportation Research Procedia, Vol. 10, pp. 574-583.

-Macedo, R., Benmansour, R., Artiba, A., Mladenović, N. and Urošević, D. (2017) "Scheduling preventive railway maintenance activities with resource constraints", Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 58, Issue Supplement C, pp. 215-222.

-Peng, F., Kang, S., Li, X., Ouyang, Y., Somani, K. and Acharya, D. (2011) "A Heuristic Approach to the Railroad Track Maintenance Scheduling Problem", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 26, Issue 2, pp. 129-145.

-Peng, F. and Ouyang, Y. (2012) "Track maintenance production team scheduling in railroad networks", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 46, Issue 10, pp. 1474-1488.

-فتحعلی، مسعود و ذاکری، جبارعلی (۱۳۹۴) تحلیل هزینه چرخه عمر در مهندسی راه آهن "از دیدگاه مدیریت نگهداری و تعمیر": تهران، انتشارات جهانتاب.

-شماعی زاده، محمد (۱۳۹۶) "بهینه سازی برنامه ریزی ماشین آلات مکانیزه عملیات تعمیر و نگهداری خطوط در راه آهن"، رساله کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر مسعود یقینی، تهران: دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-یقینی، مسعود و اخوان کاظم زاده، محمد رحیم (۱۳۹۳) "الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری"، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

-Budai, G., Huisman, D. and Dekker, R. (2006) "Scheduling preventive railway maintenance activities", Journal of the Operational Research Society, Vol. 57, No. 9, pp. 1035-1044.

-Cheung, B. S. N., Chow, K. P. L., Hui, C. K. and Yong, A. M. K. (1999) "Railway track possession assignment using constraint satisfaction", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 12, Issue 5, pp. 599-611.

-Higgins, A. (1998) "Scheduling of railway track maintenance activities and crews", Journal of the Operational Research Society, Vol. 49, Issue 10, pp. 1026-1033.

-Higgins, A., Ferreira, L. and Lake, M. (1999) "Scheduling rail track maintenance to minimize overall delays," presented at 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel.

ارائه یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی ماشین‌آلات نگهداری و تعمیر راه‌آهن

مسعود یقینی، در سال ۱۳۸۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی از دانشگاه جیاوتونگ پکن از کشور چین گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسائل بهینه سازی در برنامه ریزی حمل و نقل ریلی شامل گروه بندی واگنها، برنامه ریزی تشکیل قطارها، زمانبندی حرکت قطارها، برنامه ریزی خدمه، برنامه ریزی تخصیص لکوموتیو، برنامه ریزی خطوط مسافری برنامه ریزی عملیات مانور، تجزیه و تحلیل ظرفیت خطوط و ایستگاهها؛ تکنیکهای داده کاوی در حمل و نقل ریلی نظیر تحلیل داده های فروش بلیط، تاخیرات قطارهای مسافری، دسته بندی ایستگاههای راه آهن، نامنظمی های هندسی خطوط، و سوانح و ایمنی سیر و حرکت راه آهن؛ و مدیریت فرایندهای سازمانی شامل تحلیل و باز طراحی فرایند، طراحی و پیاده سازی سیستمهای کامپیوتری، و مدیریت فناوری اطلاعات است. ایشان در حال حاضر دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران است.



مهسا سادات میرقوامی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه الزهرا تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی در سال ۱۳۹۷ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی، بهینه سازی و شبیه سازی سیستم های حمل و نقل، آنالیز داده و شبکه، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین بوده و در حال حاضر دستیار آموزشی در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



محمد شماعی زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه آهن گرایش حمل و نقل ریلی در سال ۱۳۹۶ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه سازی در حمل و نقل است.

