

## تجزیه و تحلیل عملکرد محوطه مانوری آپرین با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی

مسعود یقینی\*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
نریمان نیکو، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حسین جعفری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

E-mail: yaghini@iust.ac.ir

دریافت: ۸۹/۰۳/۲۴ - پذیرش: ۸۹/۱۰/۰۱

### چکیده

محوطه‌های مانوری، وظیفه قبول قطارهای ورودی، تغییر آرایش و اعزام قطار به ایستگاه بعدی را بر عهده دارند. صرف زمان زیاد در محوطه مانوری برای واگنها، به علت نبودن تعادل بین ورودیها و منابع موجود در محوطه مانوری است. در این مقاله برای اولین بار در ایران، یک مدل شبیه‌سازی برای یک محوطه مانوری مسطح ارائه شده است. ورودیهای اصلی مدل شامل تعداد خطوط ایستگاه، تعداد لکوموتیوهای مانوری، توزیعهای احتمالی نظیر زمان ورود و تعداد واگنهای هر قطار، انواع قطارهای ورودی، زمان عملیات مانور، بازرسی و توقف می‌شود. در مدل ارائه شده، با پیگیری حرکت واگنها، عملیات محوطه مانوری آپرین شامل فرآیندهای قبول، تشکیل، تغییر آرایش، اعزام قطارها و گروه‌بندی واگنها به منظور تحلیل عملکرد منابع موجود، شبیه‌سازی شده است. عملکرد محوطه مانوری آپرین در شرایط فعلی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با تغییر تعداد لکوموتیوهای مانوری و نرخ واگنهای ورودی، شاخصهایی نظیر مدت زمان حضور واگنها در محوطه و نرخ بهره‌برداری از لکوموتیوهای مانوری محاسبه گردیده است. مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزار قدرتمندی برای تحلیل و تصمیم‌گیری در خصوص افزایش امکانات و تجهیزات محوطه‌های مانوری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه باری راه آهن، محوطه مانوری، تحلیل عملکرد محوطه مانوری، شبیه‌سازی

### ۱. مقدمه

به مقصد مورد نظر حمل شوند. به همین دلیل عملیات تفکیک و تشکیل قطار در شبکه راه آهن تعریف و ایستگاههایی نیز به همین منظور با تعداد بیشماری خط احداث شده است. عملیات داخلی این ایستگاهها، تأثیر زیادی بر روی عملکرد کل شبکه حمل و نقل ریلی دارد. بهبود عملکرد ایستگاه با در نظر گرفتن ویژگیهای ایستگاه نظیر موقعیت جغرافیایی، تعداد سیرگاههای متهمی به ایستگاه، تعداد خطوط، تعداد پرسنل عملیاتی، فناوری مانور و حتی تعداد سوزن و سیستم علائم و ارتباطات ایستگاه،

در سیستمهای حمل و نقل ریلی، معمولاً واگنهای یک تقاضا به طور مستقیم توسط یک قطار از مبدأ به مقصد آن تقاضا حمل نمی‌شوند، بلکه با توجه به تحلیلهای اقتصادی و محدودیتهایی چون به حد نصاب رسیدن تعداد واگنها برای حرکت به سمت یک مقصد خاص یا محدودیت تعداد لکوموتیو موجود در شبکه، هر قطار، واگنهایی با مقاصد مختلف را حمل می‌کند. به همین دلیل این واگنها باید در نقاطی از هم تفکیک شوند و سپس با تشکیل قطار دیگری - یا اتصال واگنها به یک قطار موجود دیگر

تفکیک شدند و نحوه ارتباط میان آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل تحلیلی و نوشتاری برای عملیات مختلف تهیه شد. در انتها مدل طراحی شده به مدل نرم‌افزاری تبدیل گردید.

**مرحله ۵:** در این مرحله ارزیابی عملکرد وضعیت موجود و تحلیل حساسیت مدل انجام گرفت و با تغییرات در تعداد لکوموتیوهای مانوری، به بررسی تأثیر آن در بهبود عملکرد ایستگاه آپرین پرداخته شد.

در بخش بعدی مقاله، مفاهیم پایه‌ای محوطه‌های مانوری ارائه می‌شود. در بخش ۳ مروری بر مطالعات انجام شده مرتبط با موضوع شامل مدل‌های تحلیلی، نظریه صف، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه شده است. در بخش ۴ مشخصات ایستگاه آپرین و مروری بر داده‌های جمع‌آوری شده، آمده است. مدل تحلیلی و شبیه‌سازی شده محوطه مانوری آپرین، در بخش ۵ مقاله ارائه شده است. در بخش ۶ مقاله، خروجیهای مدل شبیه‌سازی شده و تحلیل نتایج و تحلیل حساسیت روی تعداد لکوموتیو مانوری انجام شده است. در انتها خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده، آورده شده است.

## ۲. عملیات در محوطه مانور

محوطه‌های مانور و ایستگاههای راه آهن مانند یک منبع به شبکه راه آهن خدمت‌رسانی می‌کنند، به این معنا که وظیفه قبول و اعزام مجدد واگنهای راه آهن را به مقاصدشان بر عهده دارند. ایستگاه به مکانی گفته می‌شود که شامل یک یا چند محوطه است [Washington State Transportation Commission, 2006] در ایستگاههای تشکیل‌دهنده راه آهن، عملیات تشکیل، تنظیم و آرایش قطارها انجام می‌پذیرد. محوطه‌های مانوری اختصاصی برای انواع واگنهای باری، سکوها، تخلیه و بارگیری و خطوط قیان از دیگر امکانات این ایستگاهها به شمار می‌روند [مقررات عمومی حرکت، ۱۳۸۷]. نمونه‌ای از این ایستگاهها، ایستگاه آپرین است که جهت ساماندهی ترافیک باری طراحی شده است.

در حالت کلی سه نوع محوطه مانوری مسطح، تپه‌ای<sup>۲</sup> و جاذبه‌ای<sup>۳</sup> از نظر سطوح ارتفاعی وجود دارد. محوطه مانوری مسطح، محوطه‌ای بدون شیب و فراز و تقریباً هم سطح است و جابجایی واگنها با نیروی کشش لکوموتیو صورت می‌پذیرد.

می‌تواند بر شرایط ایستگاه تأثیر بگذارد. در آمریکا ۷۷٪ زمان واگنها در ایستگاهها صرف می‌شود. در هر چرخه واگن به طور مستقیم ۵ تا ۶ بار عملیات مانور روی آن انجام می‌شود و افراد متخصصی برای عملیات مانور اختصاص می‌یابند. در راه آهنهای دنیا تقریباً ۲۰٪ لکوموتیوهای راه آهن، به مانور داخلی ایستگاهها می‌پردازند، در عین حال تقریباً ۲۵٪ از اعتبارات راه آهن، در محوطه‌های مانوری، هزینه می‌شوند [یقینی، ۱۳۸۹]. به منظور پاسخگویی به حجم متغیر ترافیک، محوطه‌های مانور باید ظرفیت مناسب برای انجام فعالیتهای لازم را تضمین کنند.

هدف از این مقاله ارائه یک متدولوژی مناسب و سازگار با راه آهن ایران، به کمک ابزاری معتبر، برای ارزیابی و تحلیل عملکرد عملیات محوطه مانوری مسطح است. به عنوان مطالعه موردی، محوطه مانوری آپرین، یکی از مهم‌ترین محوطه‌های مانور در راه آهن جمهوری اسلامی ایران انتخاب شده است. براساس بررسیهای به عمل آمده، این مطالعه اولین پژوهش در راه آهن جمهوری اسلامی ایران است که به تحلیل عملکرد محوطه‌های مانور برای شناخت دقیق فرآیندهای قبول، بازرسی، گروه‌بندی و تشکیل قطار پرداخته است. مراحل انجام شده در این مطالعه به شرح زیر است:

**مرحله ۱:** پس از مطالعه منابع و اطلاعات جمع‌آوری شده، کارهای انجام شده براساس کاربرد و تکنیکهای مورد استفاده، دسته‌بندی شدند. به دلیل اهداف تعیین شده و تأکید بر کاربردی بودن، روش شبیه‌سازی انتخاب شد.

**مرحله ۲:** ایستگاه آپرین به دلیل وسعت مناسب و نیز حجم و تنوع عملیات تشکیل و تفکیک قطارهای باری، انتخاب شد.

**مرحله ۳:** این مرحله با بازدید از ایستگاه آپرین شروع شد. در این مرحله به صورت دقیق فرآیندهای قبول، بازرسی، تفکیک و تشکیل قطار مورد توجه قرار گرفت و زمان‌گیرهای مختلف از عملیات مانور انجام شد. با مسئولین و کارکنان ایستگاه در مورد نحوه عملیات و شرایط تشکیل قطار مصاحبه شد و اطلاعات نوشتاری مانند گراف حرکت قطار دریافت گردید. خروجی این بخش داده‌هایی مانند زمان ورود، زمان خروج، تعداد واگن، زمان بازرسی، زمان تفکیک و تشکیل قطار و نیز نحوه ارتباطات درون ایستگاهی و بین ایستگاهی بود.

**مرحله ۴:** در این مرحله، تحلیل مسأله و طراحی و پیاده‌سازی مدل انجام شد. کلیه عملیات ایستگاه از مرحله قبول تا اعزام

بیان می‌شود. ظرفیت استاتیک نظری<sup>۷</sup> به معنای توانایی محوطه مانور در جادادن به تعداد ثابتی واگن است. این نوع ظرفیت تنها به زیرساخت مربوط است. ظرفیت استاتیک برابر با طول واگنهای قرار گرفته در خطوط محوطه مانوری است. در صورتی که خطوط محوطه به اهداف مشخصی نظیر پارکینگ، گروه‌بندی، قبول، اعزام، تعمیرات یا قطارهای متوقف شده برای انفصال و اتصال، اختصاص یابد، هر کدام دارای ظرفیت مجزایی خواهند بود. مجموع این ظرفیتهای مجزا، ظرفیت کل را تشکیل می‌دهد. ظرفیت استاتیک عملی<sup>۸</sup> یک محوطه مانور، برابر با ۶۰ تا ۸۰ درصد ظرفیت استاتیک نظری است. محوطه مانوری همواره باید دارای خطوط خالی برای قبول، مانور و اعزام واگنها باشد [Washington State Transportation Commission, 2006]. ظرفیت دینامیک<sup>۹</sup> به معنای توانایی ایستگاه در قبول، مانور و اعزام قطار است که به صورت قطار در ساعت، برای قبول و اعزام، واگن در ساعت برای مانور بیان می‌شود. ظرفیت استاتیک به صورت غیرمستقیم به ظرفیت دینامیک مرتبط است. اگر ترافیک عبوری از ظرفیت دینامیک بیشتر شود، تعداد واگنهای محوطه ممکن است بیشتر از ظرفیت استاتیک گردد. ظرفیت دینامیک به زیرساخت، کارکنان و تجهیزات وابسته است. محوطه گروه‌بندی دارای محدودیت ظرفیت مشخصی است که به صورت تعداد واگن در هر خط تعریف می‌شود. مثلاً اگر محوطه گروه‌بندی دارای ۵ خط و ظرفیت هر خط ۵۰ واگن است، آنگاه ظرفیت برابر با ۵۰ واگن برای هر کدام از ۵ خط خواهد بود [Washington State Transportation Commission, 2006]. ظرفیت ایستگاه به معنی تعداد واگنهایی است که یک ایستگاه در شبانه روز قادر به قبول، ساماندهی، مدیریت و اعزام آنها به خطوط، ایستگاهها یا مقاصد از پیش تعریف شده خواهد بود. ظرفیت ایستگاه، ترکیبی از ظرفیت اجزای تشکیل دهنده آن شامل خطوط قبول و اعزام، سوزنها و دنباله‌های مانوری است.

### ۳. مروری بر ادبیات موضوع

در این بخش به بررسی و معرفی کارهای مرتبط با موضوع مقاله پرداخته می‌شود. کارهای انجام شده در این زمینه را می‌توان بر اساس تکنیکهای استفاده شده در آنها به چهار گروه مدل‌های تحلیلی، نظریه صف، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقسیم کرد.

محوطه‌های مانوری در شبکه ریلی کشور، از این دسته هستند. محوطه‌های مانوری تپه‌ای، محوطه‌هایی هستند که از طریق شیب دادن به خطوط راه آهن، واگنها را رها و سپس با ایجاد سرعتی به صورت خود کشش، واگنها را گروه‌بندی می‌کنند. محوطه مانوری جاذبه‌ای مانند محوطه‌های مانور تپه‌ای عمل می‌نمایند، با این تفاوت که کل محوطه در سراسیبهی ساخته می‌شود و بنابراین به تعداد کمتری لکوموتیو مانوری نیاز است [Marinov and Viegas, 2009].

فعالتهای اصلی در یک محوطه مانوری شامل عملیات قبول، تفکیک، گروه‌بندی، تشکیل و اعزام قطار است. قطار پس از ورود به ایستگاه باید روی خطی توقف کند تا واگنها برای انجام عملیات بعدی آماده شوند، زمانی که قطار وارد ایستگاه شد، واگنها از نظر فنی بازرسی می‌شوند. کل زمان برای عملیات قبول یک قطار ممکن است چند ساعت به طول انجامد. واگنهای قطار قبولی به صورت عمومی متعلق به مقاصد مختلفی هستند. یک محوطه گروه‌بندی، دارای خطوط گروه‌بندی<sup>۴</sup> برای عملیات جداسازی واگنهاست. اغلب، تعداد کمی از واگنها در محوطه گروه‌بندی<sup>۵</sup> تخلیه می‌شوند. هر خط محوطه مانور به یک مقصد اختصاص می‌یابد. محوطه گروه‌بندی لزوماً مقصد واگنها نیست، بلکه محلی برای تشکیل قطار است. زمانی که قطار طبق زمانبندی اعلام شده باید اعزام شود، واگنها باید از خطوط گروه‌بندی خارج شوند و سپس عملیات اتصال یا تشکیل قطار انجام شود. زمانی که فرآیند تشکیل قطار کامل شد، قطار دارای یک یا چند مقصد مختلف است. در این هنگام، واگنها بر اساس ایستگاه مقصد روی مسیر قطار گروه‌بندی می‌شوند، این فرآیند بلاکینگ<sup>۶</sup> قطار نامیده می‌شود [White, 2003].

شاخصهای عملکرد ایستگاهها شامل تعداد واگنهای وارد شده و خارج شده، تعدادی واگنهای بارگیری و تخلیه شده، میزان بار بارگیری و تخلیه شده، تعداد قطارهای تشکیل شده و تعداد واگنهای آنها، تعداد قطارهایی که تغییر آرایش داشته‌اند به همراه تعداد واگنهای انفصال و اتصال شده و تعداد قطارهای عبوری بدون عملیات مانور است [یقینی، ۱۳۸۹].

ظرفیت ایستگاه برابر با مجموع ظرفیت محوطه‌های ایستگاه است. ظرفیت محوطه مانوری به دو صورت ظرفیت استاتیک و دینامیک

## ۱-۳ مدل‌های تحلیلی

تحلیل کرده است. در این مقاله عملیات مختلف در محوطه مانوری تحت استراتژیهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از تحلیل فرآیند صف و تحلیلهای آماری، زمانبندی و بازدهی عملیات و عملکرد ایستگاه، ارزیابی شده است. با استفاده از مدل‌های تحلیل محوطه، یعنی مدل تحلیل داخلی و سیستم مدلسازی فرآیند صف محوطه، یک روش برای مطالعه محوطه و ارزیابی عملکرد آن ارائه شده است. همچنین با استفاده از مدل‌های آماری، عملکرد محوطه را تحت استراتژیهای مختلف بررسی می‌کند [Dong, 1997].

## ۳-۳ مدل‌های شبیه‌سازی

دانگ با استفاده از تکنیکهای شبیه‌سازی و تئوری صف، عملیات واگنهای باری در محوطه‌های مسطح را تحلیل کرده است [Dong, 1997]. مالای سه تجربه شبیه‌سازی انجام شده در راه آهن یونیون پسیفیک<sup>۱</sup> را تشریح می‌کند. یکی از این مدل‌ها، مدل شبیه‌سازی محوطه مانوری است. از خروجیهای این مدل، مدت زمان انجام فرآیندها در محوطه مانوری است. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار SIMPROCESS استفاده شده است [Malay (et al.), 2001]. ریزولی (۲۰۰۲) ایستگاههای ترکیبی ریل - جاده را با هدف تحلیل تجهیزات و تأخیرات زمانی در محوطه، شبیه‌سازی کرده است [Rizzoli (et al.), 2008].

سینای با استفاده از مدل شبیه‌سازی و نرم‌افزار Arena به تحلیل ظرفیت و مدت زمان حضور در محوطه و بهره‌وری محوطه مانوری مسطح پرداخته است [Sinay, 2008]. ماریف مدل شبیه‌سازی را برای ارزیابی عملکرد محوطه مانوری ارائه کرده است. ماریف در مقاله خود از شبیه‌سازی نمایشی توسط یک زبان شبیه‌سازی پیشامد محور به نام Simul 8 استفاده می‌کند تا با ایجاد مدلی از رفتار محوطه مانوری مسطح، شاخصهای عملکردی محوطه را تحلیل و ارزیابی کند. فرآیند ورود قطارها توسط توزیعهای وابسته به زمان، تولید می‌شود. در این مطالعه، مدل شبیه‌سازی بارها تکرار و اجرا شده است. الگوهای ورود زمانبندی شده قطار با الگوهای بدون زمانبندی، مقایسه شد و همچنین عملکرد ایستگاههای تک محوطه‌ای بررسی شد. سرانجام بعد از همه این مراحل، تغییرات در

داگانزو فرآیندهای بهبود عملکرد محوطه‌های گروه‌بندی را با استفاده از استراتژیهای گروه‌بندی چند مرحله‌ای در محوطه‌های مانور مسطح بررسی کرده است، این استراتژیها منجر به استفاده مؤثر از خطوط می‌شوند، معادلات به دست آمده، زمان خدمت به ازای هر واگن و نیازمندیهای مکانی سه استراتژی گروه‌بندی چند مرحله‌ای، شامل گروه‌بندی از طریق برش، از طریق قطار و مثلثی را مشخص می‌کند [Daganzo, Dowling, and Hall, 1983]. جاکوب با یک مدل چند مرحله‌ای برای گروه‌بندی قطارهای باری به ارائه، تحلیل و بهبود روشهای گروه‌بندی قطارها برای محوطه‌های مانوری پرداخته است [Jacob, 2007]. بین نیز به ارزیابی محوطه‌های مانور با تکنیک خوشه‌بندی فازی پرداخته است، این مقاله رویکرد جدیدی را برای تحقیقات کمی در مورد گروه‌بندی ایستگاه باری ارائه کرده است [Yin, 2007]. بکتاس با هدف بهبود عملکرد محوطه‌های مانوری، روشی را ارائه می‌کند که منجر به کاهش زمان حضور واگنهای خالی در محوطه مانوری می‌شود [Bektas, 2009]. درنبرگر با استفاده از دیدگاه مدیریت تولید و استفاده از تئوری محدودیتها، مدلی ابتکاری برای بهبود عملکرد محوطه‌های گروه‌بندی ارائه می‌کند. در این کار، با در نظر گرفتن ایستگاه به عنوان یک سیستم تولیدی، به بهبود عملکرد گلوگاه فرآیندهای ایستگاه، یعنی عملیات مانور به عنوان بخشی از فرآیند تشکیل قطار پرداخته است، زیرا که فرآیند تشکیل قطار، به عنوان اصلی‌ترین گلوگاه در اکثر محوطه‌های مانوری شناخته می‌شود [Dirnberger, 2007].

## ۲-۳ مدل‌های نظریه صف

ترنکیست با استفاده از نظریه صف به ارزیابی تأخیرهای زمانی و زمان فعالیت‌های محوطه‌های مانور پرداخته است. بر این اساس، وی مدلی بر مبنای نظریه صف ارائه می‌کند. سپس تحلیلهای آماری مختلفی از زمان تأخیر در صف ارائه می‌نماید. نهایتاً استراتژیهای مختلف و جایگزین را برای فرآیند تفکیک قطار بین خطوط محوطه و بین محوطه‌ها ارائه می‌کند [Turnquist and Daskin, 1982]. دانگ با استفاده از نظریه صف، عملیات واگنهای باری را در محوطه‌های مانوری مسطح

راه آهن و با تکنیک بهینه‌سازی، عملکرد محوطه‌های گروه‌بندی و تجهیزات و امکانات محوطه‌های مانوری مسطح و تپه‌ای را تحلیل کرده است [He, Song and Hu, 1997]. خنی با استفاده از مدل ریاضی فازی چندهدفه، تعداد واگنهای خروجی از محوطه را در مسأله اعزام فازی، حداکثر می‌کند. نویسندگان برای حل مسئله از رویکرد ترکیبی الگوریتم ژنتیک و جستجوی محلی استفاده کرده‌اند. همچنین برای ارزیابی مدل از مثال واقعی استفاده شده است و نسبت به کارهای قبلی به نتایج بهتری در زمان قابل قبول رسیدند [He, Song and Chaudhry, 2000].

دالهاوس عملکرد محوطه‌های مانور تپه‌ای را با برنامه عدد صحیح، بهینه کرده و به مسئله مانور قطار می‌پردازد. هدف این مقاله ارائه روشی ریاضی برای بکارگیری کمترین تعداد خطوط مانور برای تشکیل قطار است. مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی عملیاتی قابل استفاده است. این مقاله در فاز برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت دسته‌بندی می‌شود (a) [Dahlhaus et al., 2000]. در مقاله دیگری نیز دالهاوس (۲۰۰۰) با استفاده از برنامه عدد صحیح، سفرهای مانوری را در محوطه‌های مانوری تپه‌ای بهینه می‌سازد [Dahlhaus (b) et al., 2000]. وندن بروگ با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم شاخه و کران، سفرهای مانوری قطارهای مسافری را برای مسیرهای ثابت و متحرک کاهش داده است [Broek, 2007]. مطالعات بررسی شده به صورت جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند.

الگوهای ورود به دقت بررسی شده است. تأثیر افزایش ورود تعداد قطارهای باری بر تولید صف در محوطه و نیز بر کیفیت بهره‌برداری از منابع محوطه مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه فعالیت‌های فوق می‌توانند در جهت دسترسی به سطح بهینه بهره‌برداری از منابع محوطه مورد استفاده قرار گیرند [Marinov, 2007, Marinov and Viegas, 2009].

### ۳-۴ مدل‌های بهینه‌سازی

یاگار و ساکامونو با فرض تعداد خطوط ثابت، به صورت دو مرحله‌ای، عملیات مانور را بهینه می‌کنند. هدف این مقاله کاهش مدت زمان حضور واگن‌ها در محوطه مانوری است. توالی مانور با استفاده از برنامه‌ریزی پویا، مدل‌سازی شده است [Yagar, Saccomanno and Shi, 1983].

گویگنارد و کرافت برنامه عدد صحیح ترکیبی ارائه داده‌اند که توالی مانور و تخصیص به خطوط گروه‌بندی را مشخص می‌کند. هدف این مقاله بهبود عملکرد محوطه مانور در زمان مناسب و با کمترین هزینه بوده است. این کار از طریق مدل‌سازی ترکیبی جریان چند کالایی صورت گرفته است. ضعف این رویکرد بهینه‌سازی در این است که هر اندازه افق زمانی و تعداد متغیرها افزایش یابد، حل مسئله سخت می‌گردد و حل آن با روشهای دقیق غیرممکن می‌شود [Guignard and Kraft, 1993]. خنی با مدل‌سازی عملیات تفکیک با کمک سیستم پشتیبانی تصمیم در

جدول ۱. دسته‌بندی مطالعات انجام شده بر اساس تکنیکها و نوع محوطه مانور

تکنیک	محوطه مانوری تپه ای	محوطه مانوری مسطح
تحلیلی	داگانزو (۱۹۸۳)، جاکوب (۲۰۰۷)، یانگ بین (۲۰۰۷)، بکتاس (۲۰۰۸)، درنبرگر (۲۰۰۷)	یانگ بین (۲۰۰۷)، بکتاس (۲۰۰۸)، درنبرگر (۲۰۰۷)
نظریه صف	ترنکیست (۱۹۸۲)	دانگ (۱۹۹۷)، ترنکیست (۱۹۸۲)
شبیه‌سازی	دالال (۲۰۰۱)، ریزولی (۲۰۰۲)، مارینف (۲۰۰۷، ۲۰۰۹)	دانگ (۱۹۹۷)، دالال (۲۰۰۱)، ریزولی (۲۰۰۲)، مارینف (۲۰۰۷، ۲۰۰۹)، سینای (۲۰۰۸)
بهینه‌سازی	یاگار و ساکامونو (۱۹۸۳)، گویگنارد و کرافت (۱۹۹۳)، خنی (۱۹۹۷، ۲۰۰۰)، دالهاوس (۲۰۰۰ a,b)	گویگنارد و کرافت (۱۹۹۳)، خنی (۱۹۹۷، ۲۰۰۰)، بروک (۲۰۰۷)

دو سمت ایستگاه بر عهده دارند. ایستگاه دارای ۲ جرثقیل ریلی، ۲ دیوی لکوموتیو، ۲ خط مخصوص تعمیر و نگهداری و ۲ اتاق سوزن‌بانی در دو طرف محوطه است. محوطه آپرین دارای ۴ مبادی ورودی و خروجی است (شکل ۲)، و انجام عملیات بارگیری به صورت شبانه‌روزی و ۴ نوبت کاری انجام می‌شود.

## ۵. مدل‌سازی محوطه مانوری آپرین

### ۱-۵ شبیه‌سازی

در این مقاله برای تجزیه و تحلیل عملکرد محوطه مانوری آپرین از تکنیک شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی تقلیدی از یک سیستم یا فرآیند واقعی است. شبیه‌سازی ابزار و روشی برای تجزیه و تحلیل و مقایسه سیستم‌های پیچیده‌ای که تکرارپذیر باشند را در اختیار ما قرار می‌دهند [Kelton, Sadowsky and Sturrok, 2003]. در یک مدل شبیه‌سازی اجزای یک سیستم عبارتند از: نهاد، خصوصیت، فعالیت، پیشامد و متغیرهای حالت که باید برای مدل‌سازی مشخص شوند.

[Low and Kelton, 1991]. در مدل پیشنهادی، قطار، به عنوان نهاد در نظر گرفته شده است. به قطار خصوصیتی نظیر نوع قطار، مقصد قطار و تعداد واگن تخصیص می‌یابد. پیشامدهای مدل شامل ورود قطار به ایستگاه، اعزام قطار و عملیات گروه‌بندی است. متغیرهای حالت شامل وضعیت بلاکهای مجاور ایستگاه آپرین، زمان آزاد شدن هر بلاک، تعداد واگنهای موجود در ایستگاه، تعداد خطوط و لکوموتیو مانوری مشغول به کار در ایستگاه است. در این ایستگاه، فعالیت‌هایی نظیر تعمیر، سوخت‌رسانی، تخلیه و بارگیری انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است لکوموتیو مانوری و پستهای بازدید که مسئولیت انجام عملیات در ایستگاه را بر عهده دارند، به عنوان منبع مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

چهار فاز برای شبیه‌سازی تعریف شده است که عبارتند از: تعریف مسئله، جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی، اجرای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی. در ادامه به بیان هر یک از این مراحل پرداخته می‌شود.

اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی از طریق گرافهای روزانه ایستگاه، مراجعه حضوری، زمان‌گیری و آمار راه آهن،

در مدل‌های تحلیلی فرآیندهای بهبود عملکرد محوطه‌های گروه‌بندی، در هر یک از مراحل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و روشهایی برای بهبود فرآیندهای مختلف ایستگاه نظیر نحوه گروه‌بندی و استفاده از خطوط ارائه گردیده‌اند. این مدل‌ها در واقع با بررسی فرآیندهای موجود در محوطه‌های مانوری، راهکارهایی را برای بهبود عملکرد ایستگاه ارائه می‌کنند. در مدل‌های نظریه صف با استفاده از تحلیل فرآیند صف و تحلیل‌های آماری، زمانبندی و بازدهی عملیات و عملکرد تأخیرات زمانی فعالیت‌های محوطه‌های مانور، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مدل‌های نظریه صف، پایه مدل‌های شبیه‌سازی هستند، اما از انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به مدل‌های شبیه‌سازی برخوردارند. در مقالات ارائه شده در زمینه شبیه‌سازی، فرآیندهای مانور، ظرفیت و مدت زمان حضور واگن‌ها و بهره‌وری در محوطه‌های مانوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. هدف مدل‌های شبیه‌سازی ارائه شده، ایجاد مدلی جهت شبیه‌سازی رفتار محوطه مانوری، برای تحلیل و ارزیابی شاخص‌های عملکردی محوطه است. در مدل‌های بهینه‌سازی، هدف کاهش زمان حضور واگن‌ها در سیستم از طریق کاهش تعداد سفرهای مانوری یا افزایش تعداد واگنهای خروجی است. مدل‌های بهینه‌سازی به دنبال جواب بهینه یا بهترین جواب هستند. در این مدل‌ها ممکن است محاسبات مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه، بسیار طولانی و غیر عملی باشند.

مدل‌های شبیه‌سازی برای بیان روابط بین متغیرها احتیاجی به توابع ریاضی صریح ندارند و معمولاً می‌توان دستگاه‌های پیچیده‌ای را که مدل‌سازی برای آنها ممکن نیست و یا از لحاظ ریاضی نمی‌توانند حل شوند شبیه‌سازی کرد. بنابراین به دلیل پیچیدگیهای محوطه مانوری، در این مقاله برای تحلیل عملکرد ایستگاه از تکنیک شبیه‌سازی استفاده شده است.

## ۴. مشخصات ایستگاه آپرین

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ایستگاه آپرین در ۲۰ کیلومتری جنوب غربی تهران در نزدیکی ایستگاه اسلام‌شهر قرار دارد. این ایستگاه دارای یک محوطه ۱۸ خطی به صورت ماهیچه‌ماهی شکل است.

طول خطوط ایستگاه در جدول ۲ آمده است. ایستگاه دارای ۲ لکوموتیو مانوری و ۲ گروه مانوری است که عملیات مانور را در

داشته باشد، قطار وارد ایستگاه شده و بازرسی انجام می‌گردد و لکوموتیو خط از قطار جدا شده و وارد دپو می‌شود. سپس واگنها باید منتظر انجام عملیات تفکیک بمانند.

در صورتی که خط آزاد وجود نداشته باشد، پیشامد قبول قطار با زمان جدیدی به جدول پیشامدها اضافه می‌شود. در نمودار جریان عملیات تفکیک که در شکل ۴-ج، نمایش داده شده است، در صورت آزاد بودن لکوموتیو مانوری، با حرکت لکوموتیو مانوری به خطوط محوطه، واگنها بر اساس مقصدشان در خطوط محوطه مانوری، گروه‌بندی می‌شوند. در غیر این صورت، پیشامد عملیات تفکیک با زمان جدیدی به جدول پیشامدها، اضافه می‌شود. پس از این مرحله نوبت به پیشامد عملیات تشکیل قطار است، نمودار جریان این پیشامد در شکل ۴-د نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در صورت آزاد بودن لکوموتیو مانوری، اتصال واگنها بر اساس برنامه قطار اعزامی انجام می‌شود، در غیر این صورت پیشامد تشکیل قطار با زمان جدیدی به جدول پیشامدها اضافه شده و قطار آماده اعزام می‌گردد. در نمودار جریان اعزام قطار در شکل ۴-ه، نشان داده شده است، در صورت آزادی سیرگاه، قطار اعزام می‌شود و از ایستگاه خارج می‌شود.

جمع‌آوری و توزیع‌های آن با استفاده از قسمت تحلیل‌گر داده‌ها<sup>۱۱</sup> در نرم‌افزار Arena نسخه ۱۰ استخراج شدند. توزیع‌های به دست آمده برای هر چهار سیرگاه مسیر مربوط به توزیع ورود بر اساس دقیقه، توزیع تعداد واگن قطار برای هر سیرگاه، توزیع تعداد لکوموتیو متصل به هر قطار، توزیع نوع قطار ورودی به صورت صفر و یک (صفر به معنی مسافری و یک به معنی غیر مسافری) محاسبه و وارد مدل شبیه‌سازی شد. برای نمونه توزیع آماری تعداد واگنهای ورودی هر قطار از اسلام‌شهر به سمت آپرین، به صورت توزیع نرمال با میانگین 28/6 و انحراف استاندارد ۱۰/۴ به دست آمده است (شکل ۳).

### ۲-۵ مدل تحلیلی

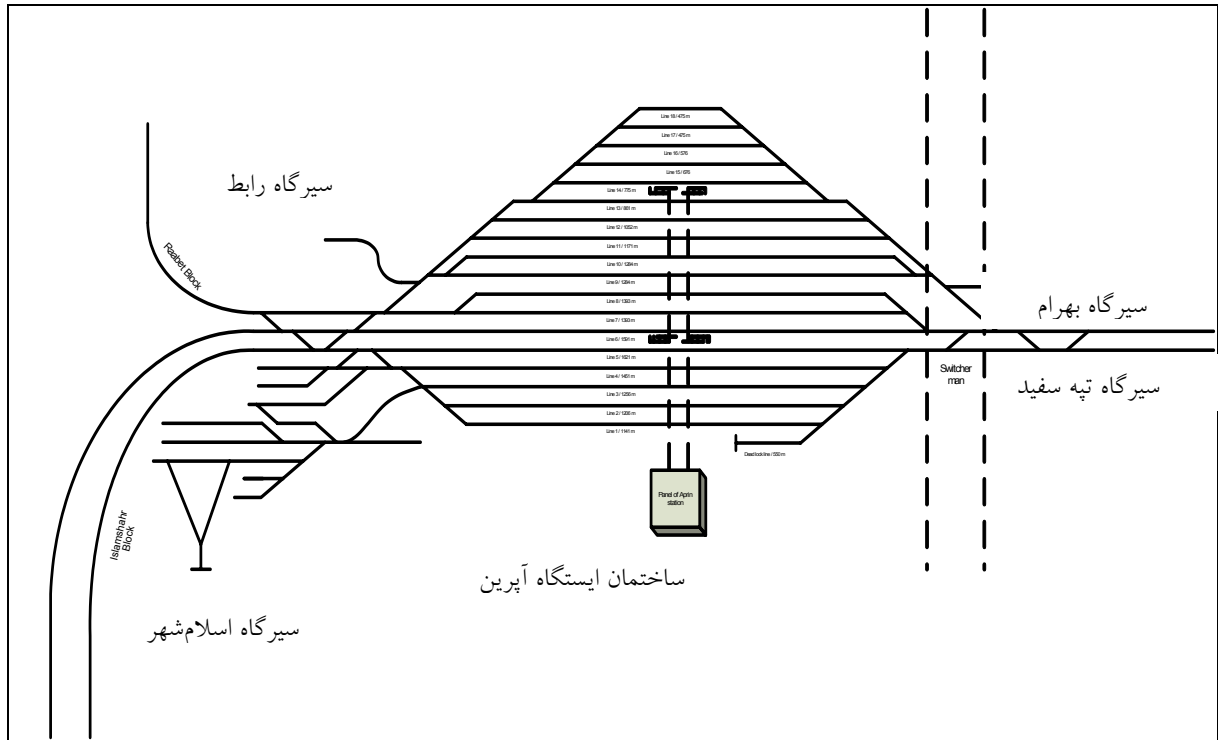
مدل تحلیلی ارائه شده برای محوطه مانوری آپرین در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴-الف پس از ساختن جدول پیشامدها، پیشامدهای مرتبط پیش‌بینی شده و در تقویم پیشامدها ثبت می‌شود و با صفر قراردادن زمان شبیه‌سازی، یکی از پیشامدهای قبول قطار، عملیات تفکیک، عملیات تشکیل، اعزام قطار، یا پایان زمان شبیه‌سازی انتخاب شده و به مرحله بعدی می‌رویم. اگر پیشامد انتخاب شده، قبول قطار باشد به شکل ۴-ب مراجعه می‌شود. در این مرحله در صورتی که خط آزاد وجود



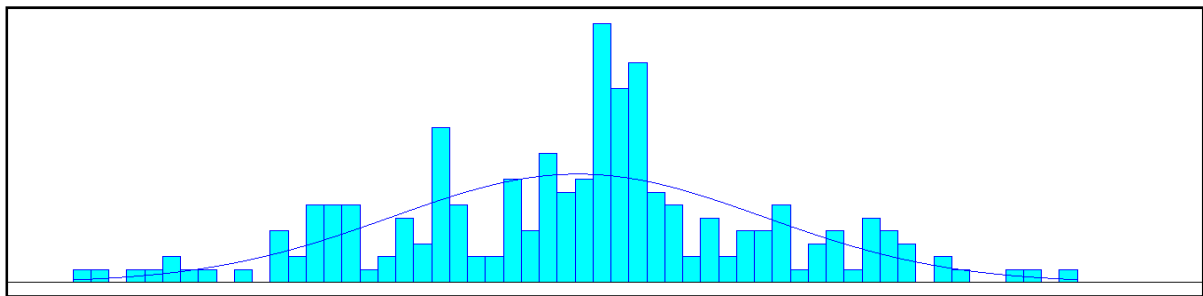
شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه راه آهن آپرین

جدول ۲. طول خطوط هجده گانه ایستگاه آپرین

شماره خط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
طول خط (متر)	۱۱۴۱	۱۲۰۸	۱۲۵۶	۱۴۵۱	۱۶۲۱	۱۵۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۳	۱۲۸۴
شماره خط	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
طول خط (متر)	۱۲۸۴	۱۱۷۱	۱۰۵۲	۸۶۱	۷۷۵	۶۷۶	۵۷۸	۴۷۵	۴۷۵

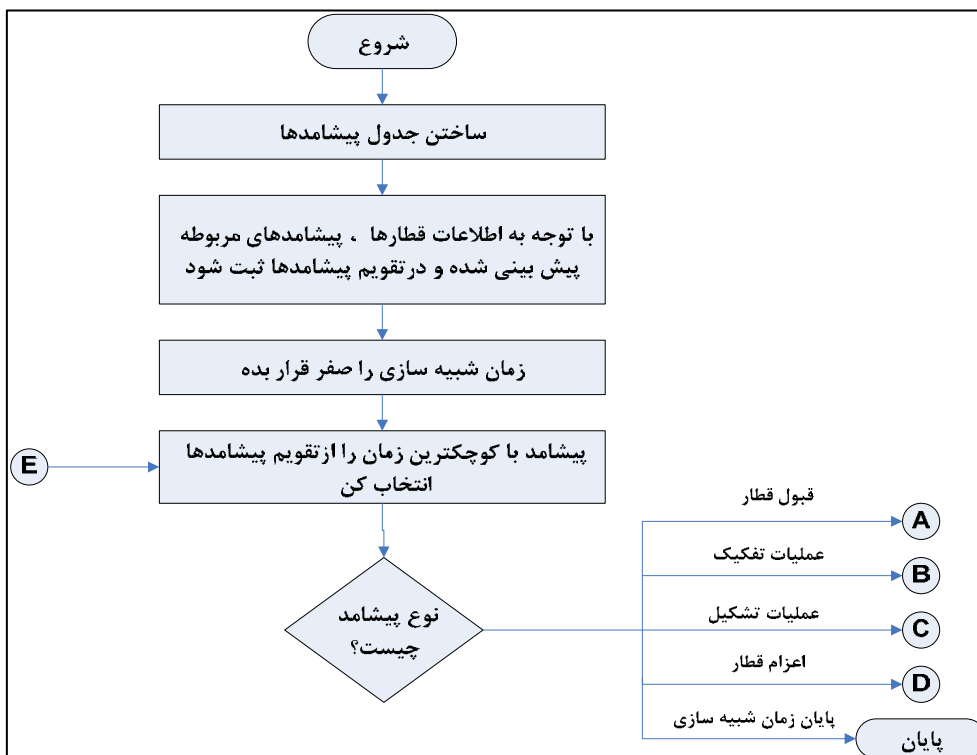


شکل ۲. ساختار ایستگاه گار آپرین [مولف]

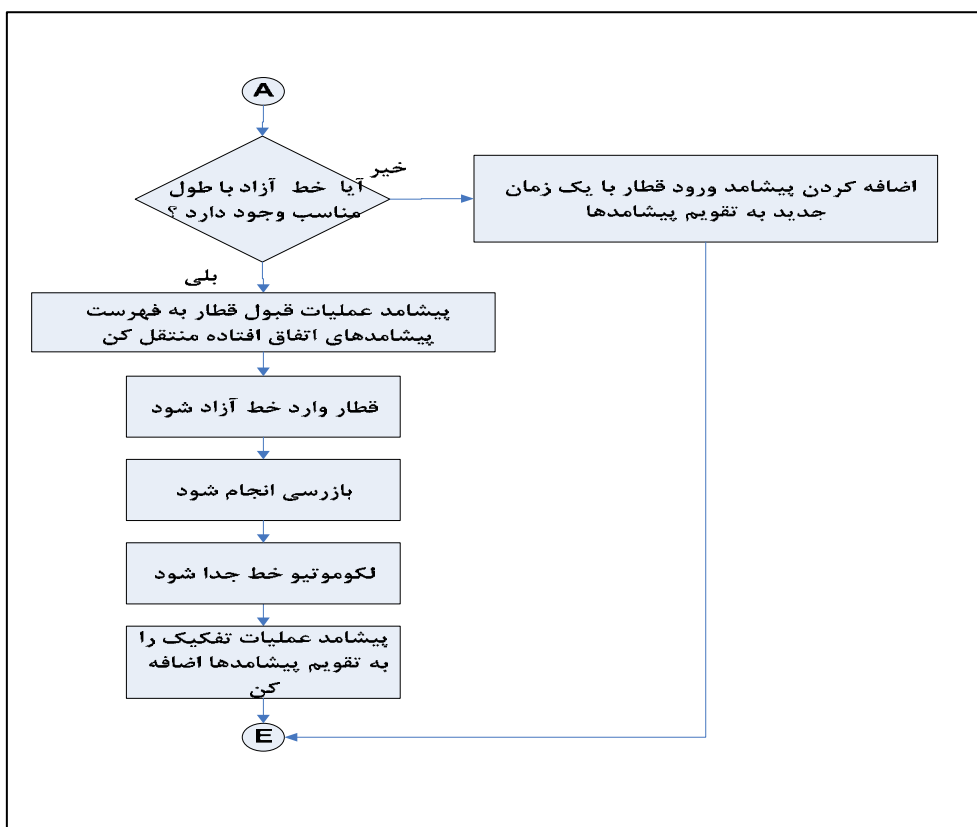


شکل ۳. تعداد واگنهای ورودی هر قطار از اسلام شهر به سمت آپرین (توزیع نرمال)

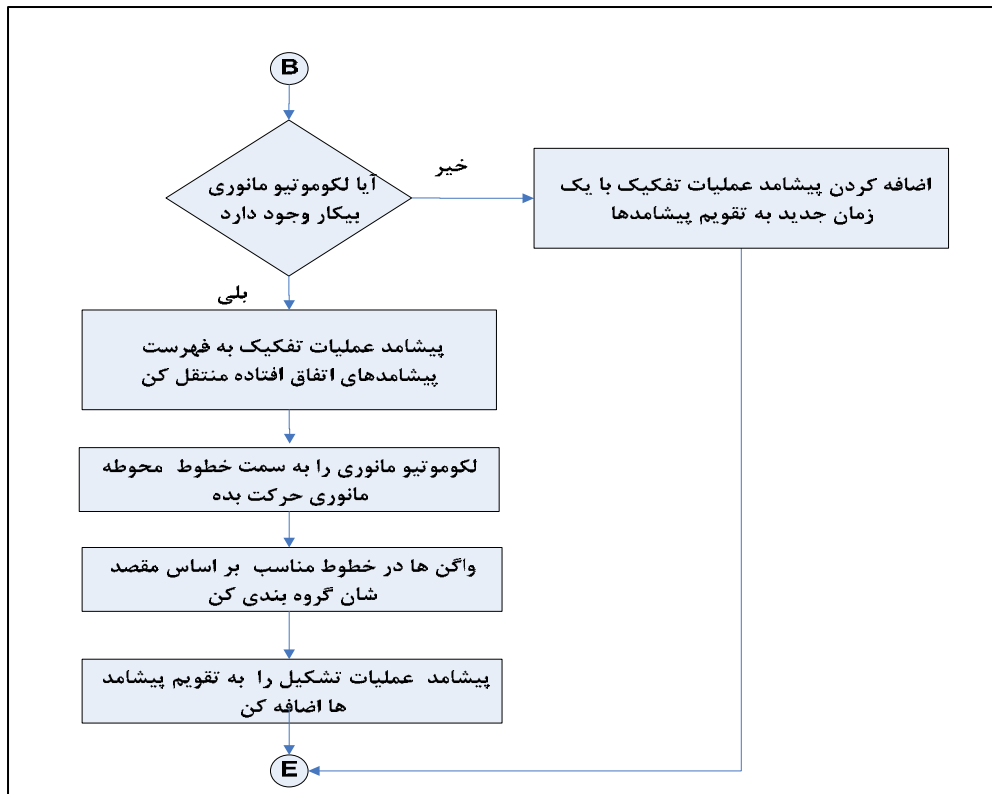




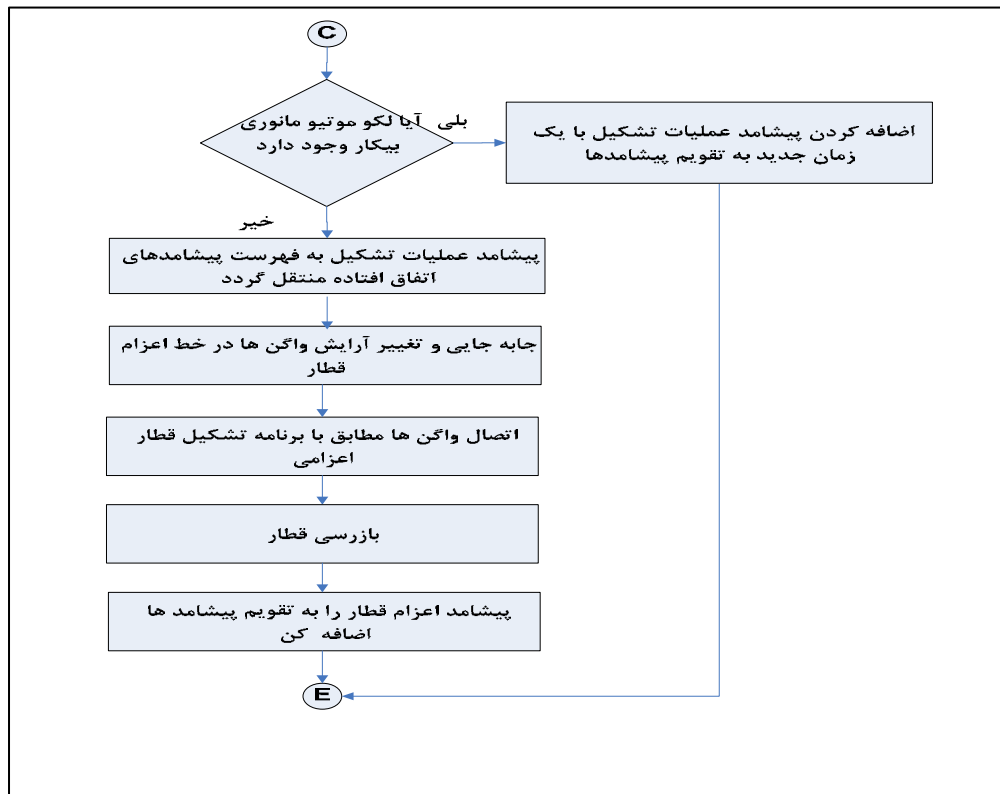
شکل ۴- الف. مدل تحلیلی محوطه مانور



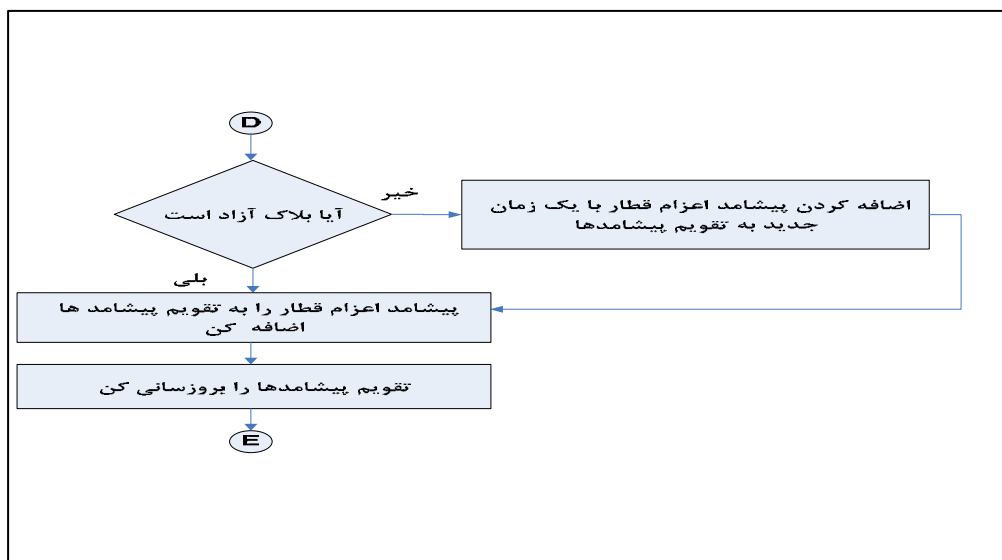
شکل ۴- ب. نمودار جریان قبول قطار



شکل ۴-ج. نمودار جریان عملیات تفکیک



شکل ۴-د. نمودار جریان عملیات تشکیل



شکل ۴-ه. نمودار جریان اعزام قطار

### ۳-۵ مدل شبیه‌سازی کامپیوتری

نظر گرفتن طول قطار تخصیص می‌یابد.

- زمان مانور و بازرسی و ورود قطار مسافری به صورت پارامتر و بر اساس زمان‌گیری حضوری در ایستگاه آپرین وارد شده است.
- زمان سفر مانوری از هر خط به خط دیگر ثابت در نظر گرفته شده است.
- زمان حرکت لکوموتیو و لکوموتیو مانوری از محوطه به دپوی دیزل، ثابت در نظر گرفته شده است.
- زمان سیر در ۴ سیرگاه به صورت متغیر در نظر گرفته شده است.

### ۲-۳-۵ شرح مدل

در شکل ۵، صفحه اصلی ارتباطی مدل ساخته شده، نشان داده شده است. در این شکل اطلاعاتی نظیر روز، ماه، ساعت شبیه‌سازی، آزادی یا اشغالی خطوط، مقصد تخصیص داده شده به هر یک از خطوط، اشغال یا آزاد بودن سیرگاههای ایستگاه آپرین، تعداد لکوموتیوهای موجود در ایستگاه، لکوموتیوهای مانوری آزاد، تعداد قطارهای ورودی از هر یک از سیرگاهها مشخص بوده و زیرمدلها و ماژولهای استفاده شده، برای شبیه‌سازی ایستگاه آپرین، در وسط شکل مشخص است. برای مدل‌سازی محوطه آپرین از ۶۳ متغیر و ۱۴۶۰ ماژول استفاده شده است. فهرست پارامترهای اصلی مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۱-۳-۵ مفروضات مدل

- برای مدل‌سازی محوطه مانوری آپرین مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:
- ایستگاه ۲۴ ساعته فعالیت دارد.
  - برای هر قطار اعزامی یک لکوموتیو مورد نیاز است.
  - برای استفاده از هر لکوموتیو مانوری یک دسته مانوری مورد نیاز است.
  - تعداد واگن مورد نیاز برای تشکیل و اعزام قطار به صورت یک متغیر در نظر گرفته شده است.
  - توزیعهای به دست آمده که در مدل وارد شده است برای هر چهار مسیر، شامل موارد زیر است:
    - توزیع ورود قطارها بر اساس دقیقه.
    - توزیع تعداد واگن هر قطار.
    - توزیع تعداد لکوموتیو متصل به هر قطار.
    - توزیع نوع قطار ورودی به صورت صفر و یک (صفر به معنی مسافری و یک به معنی غیر مسافری).
  - دو واگن با مقاصد متفاوت وارد یک خط نمی‌شوند.
  - قطارهای مسافری با اولویت خط ۶ سپس خط ۵ و در صورت اشغالی این دو خط وارد سایر خطوط می‌شوند.
  - شماره خط ورودی با اولویت خطی با شماره بالاتر و با در

خوانده شده و به قطار باری اختصاص می‌یابد. قطار مسافری، محدودیت طولی ندارد و اولویت خط برای قطارهای مسافری، خطوط ۵ و ۶ است. در صورت پر بودن این خطوط، قطارهای مسافری در خطوط دیگر ایستگاه قبول می‌شوند. قطار باری و مسافری بر اساس سیرگاه اعزامیشان وارد ۴ زیر مدل می‌شوند. زیرمدلهای سیرگاه برای اطمینان از خالی بودن سیرگاه، ایجاد شده است. پر و خالی بودن سیرگاه به صورت صفر و یک به قطار اعلام می‌شود. قطار ورودی مقدار متغیر صفر و یک را در مورد وضعیت هر سیرگاه می‌خواند و بر اساس ۰ (آزاد) و ۱ (اشغال) بودن سیرگاه در مورد قطار تصمیم‌گیری می‌شود. اگر متغیر صفر باشد، قطار به سمت ایستگاه آپرین اعزام می‌شود و مقدار متغیر یک می‌شود. اما اگر سیرگاه اشغال باشد، قطار منتظر دریافت سیگنال از ایستگاه آپرین برای اعزام به سمت ایستگاه می‌ماند. با ارسال سیگنال مقدار متغیر صفر می‌شود که نشان دهنده آزاد بودن سیرگاه است. بعد از این مرحله، به واگنهای ورودی، ناحیه مورد نظرشان - ۱۳ ناحیه - تخصیص داده می‌شود. سپس قطار وارد یکی از ۱۸ خط ایستگاه می‌شود.

لکوموتیوهای خط پس از ورود به محوطه و جداسازی از واگنها، به زیر مدل دپوی لکوموتیو منتقل می‌شوند. هنگامی که واگنها آماده اعزام شدند، لکوموتیو خط از این زیرمدل به خطی که قطار آماده اعزام قرار دارد، اعزام می‌شود.

در زیر مدل لکوموتیو مانوری، در ابتدا به تعداد از پیش تعیین شده، لکوموتیو مانوری مستقر است، و با ورود قطار به ایستگاه، به خط مورد نظر اعزام می‌شوند تا واگنهای قطار را در خطوط محوطه مانوری، جابجا نمایند. هنگامی که عملیات مانور به اتمام رسید دوباره لکوموتیوهای مانوری به دپو باز می‌گردند.

در زیر مدل‌های خطوط که به تعداد خطوط ۱۸ گانه آپرین است، با ورود هر یک از واگنها، قطارهای مسافری یا غیرمسافری، مقصد آنها در متغیر خط مورد نظر ذخیره می‌گردد، که برای نشان دادن اشغالی خط و همچنین مقصد اختصاص داده شده به آن خط مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ورود نهاد به زیر مدل خطوط، نهاد وارد ماژول "Decide" شده و بر اساس نوع نهاد، تفکیک می‌شود. در صورتی که نهاد از نوع قطار باری باشد، از طریق ماژول "Separate"، لکوموتیو و واگنهایش از قطار جدا می‌گردد. مقصد واگنها، از طریق ماژول "Assign" به واگنها اختصاص داده شده و در نهایت واگنها به وسیله لکوموتیو

فهرست پارامترهای اصلی مدل در جدول ۳ ارائه شده است. زمان مانور شامل کلیه زمانهای لازم برای انجام عملیات قبول، تغییر آرایش، تشکیل و اعزام می‌گردد. از آنجا که زمانهایی نظیر زمان بازرسی، جداگانه در نظر گرفته شده است، بنابراین زمانهای لازم برای حرکت لکوموتیو، برای انجام سفرهای مانوری مانند حرکت لکوموتیو مانوری برای انتقال واگنی از خطی به خط دیگر و یا زمان حرکت تا رسیدن به سر سوزن به صورت متغیری با شرح "قسمتی از زمان مانور" در نظر گرفته شده است. برای پارامتر "تعداد واگنهای لازم برای تشکیل قطار" به طور متوسط عدد ۲۵ در نظر گرفته شده است. در این مدل این فرض در نظر گرفته شده است که بخشی از واگنهای قطار ورودی مربوط به مقصدی مشخص است. از آنجا که مدل پیشنهادی بر اساس مقصد اولین قطار ورودی، یک مقصد تخصیص داده می‌شود. با در نظر گرفتن عدد ۵۰ برای پارامتر "درصد واگنهایی که متعلق به همان خط هستند"، ۵۰ درصد واگنهای قطار ورودی مربوط به مقصد یکسان و در نتیجه در همان خط ورودی منتظر انجام عملیات مانوری خواهند بود.

برای هر یک از ایستگاههای مجاور آپرین شامل ایستگاه بهرام، تپه سفید، اسلام‌شهر و رابط یک زیر مدل در نظر گرفته شده است. قطار از ایستگاه مجاور به سمت ایستگاه آپرین حرکت می‌کند. در این زیرمدل، زمان ورود قطار براساس یک توزیع احتمالی است، و قطار مسافری و غیرمسافری از یکدیگر جدا می‌شوند. به قطارهای غیر مسافری متغیرهای طول واگن، طول لکوموتیو، تعداد واگن و تعداد لکوموتیو داده می‌شود. تعداد واگن و لکوموتیو به صورت توزیع احتمالی، وارد مدل می‌شود. سپس طول قطار بر اساس طول واگنها و طول لکوموتیوهای آن محاسبه می‌شود. هنگامی که از ۴ ایستگاه مجاور با ایستگاه آپرین تماس حاصل می‌شود و اجازه اعزام قطار را به سمت ایستگاه آپرین اخذ می‌کند، تصمیم‌گیری و منطبق داده شده به این صورت است که اگر قطار در خطی از خطوط ۱۸ گانه، محدودیت طولی نداشته باشد، قطار را به همان خط اعزام می‌کنیم و با استفاده از منطق و فرمولهای داده شده بر اساس طول قطار و اشغال یا آزاد بودن خط، به قطار، اجازه ورود داده می‌شوند.

طول قطار باری بعد از خروج از زیر مدل، ثبت می‌شود، طول قطارهای ورودی با طول ۱۸ خط ایستگاه آپرین مقایسه شده و پر یا خالی بودن خط چک می‌گردد. در این هنگام اطلاعات قطار،

### تجزیه و تحلیل عملکرد محوطه مانوری آپرین . . .

نسبتهای از پیش تعریف شده متعلق به خطوط متفاوتی هستند و به وسیله لکوموتیو مانوری به سایر خطوط منتقل می‌شوند. بعد از این مرحله واگنها منتظر می‌مانند تا به اندازه حدنصاب از پیش تعیین شده برسند. بعد از اینکه تعداد واگنها به حد نصاب مورد نظر رسید، یک لکوموتیو خط از دپوی لکوموتیو به واگنها متصل می‌شود تا در صورت آزاد بودن سیرگاه، قطار اعزام شود و در غیر این صورت منتظر می‌ماند. پس از اعزام قطار، در صورتی که واگنی در خط باقی نمانده باشد، از طریق متغیر مربوطه، آزادی خط مورد نظر اعلام می‌شود.

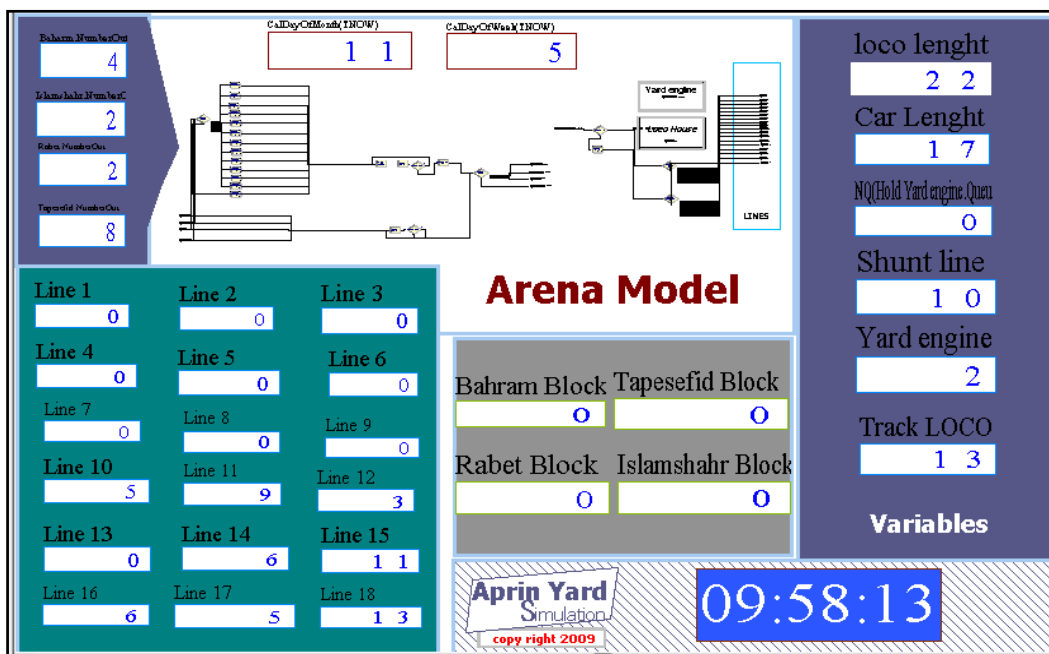
مانوری از طریق ماژول "Station" به سایر خطوط انتقال می‌یابند. در صورتی که قطار مسافری باشد، بعد از سپری کردن زمان از پیش تعیین شده از ایستگاه خارج شده و آزادی خط اعلام می‌شود (متغیر خط مورد نظر برابر صفر می‌شود که به معنای آزاد شدن خط است). اگر نوع ورودی قطار غیر مسافری باشد، پس از ورود به خط، لکوموتیو آن جدا می‌شود و به میزان زمان از پیش تعیین شده مورد بازدید فنی قرار می‌گیرد و تقاضای لکوموتیو مانوری می‌کند تا در صورت آزاد بودن لکوموتیو مانوری، واگنهای قطار تفکیک شوند. واگنهای ورودی بر اساس

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در مدل

مقدار پارامتر	شرح پارامتر
۳۰	زمان سیر بین ایستگاه بهرام و آپرین (دقیقه)
۳۰	زمان سیر بین ایستگاه اسلام‌شهر و آپرین (دقیقه)
۳۰	زمان سیر بین ایستگاه بهرام و رابط (دقیقه)
۳۰	زمان سیر بین ایستگاه تپه سفید و آپرین (دقیقه)
۳۰	مدت زمان ارائه خدمت به لکوموتیو خط (دقیقه)
۱/۵	متوسط زمان بازرسی برای هر واگن (دقیقه)
۴	زمان عبور قطار مسافری از ایستگاه (دقیقه)
۱۰	قسمتی از زمان مانور (دقیقه)
۱۷	طول واگن (متر)
۵۰	درصد واگنهایی که متعلق به همان خط هستند
۱۸	شماره خطی که برای اعزام قطار به لکوموتیو خط نیاز دارد
۲۵	تعداد واگنهای لازم برای تشکیل قطار
۱	متغیری برای نشان دادن اشغالی یا آزادی سیرگاه بهرام (دقیقه)
۱	متغیری برای نشان دادن اشغالی یا آزادی سیرگاه اسلام‌شهر (دقیقه)
۱	متغیری برای نشان دادن اشغالی یا آزادی سیرگاه تپه سفید (دقیقه)
۱	متغیری برای نشان دادن اشغالی یا آزادی سیرگاه رابط (دقیقه)
۱۷	شماره خطی که برای اعزام قطار به لکوموتیو مانوری نیاز دارد
۲۲	طول لکوموتیو (متر)
۲	تعداد لکوموتیوهای مانوری محوطه

جدول ۴. مقایسه طول قطارهای ورودی با طول خطوط

تعداد خطوطی که امکان قبول قطار را دارند	درصد	محدوده طول خط
۲	٪۲۴	$475 \geq$
۱۶	٪۷۶	$475 \leq$
۱۵	٪۵۶	$578 \leq$
۱۵	٪۳۰	$676 \leq$
۱۴	٪۱۷	$775 \leq$
۱۳	٪۸	$871 \leq$
۱۲	٪۱	$1052 \leq$



شکل ۵. مدل شبیه‌سازی رایانه‌ای

## ۶. خروجیهای مدل

### ۶-۱ اعتبارسنجی مدل ارائه شده

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی، به طور معمول از اقداماتی چون واریسی مدل توسط شخص دیگر، رسم نمودار جریان و بررسی منطق مدل در مورد هر نوع پیشامد، بررسی منطقی بودن خروجیهای مدل به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ورودی، مستندسازی مدل و تشریح متغیرها و امکانات بکار گرفته شده در مدل استفاده می‌شود [بنکس و کارسون، ۱۳۸۸].

یکی از اقدامات مهم برای اعتبارسنجی یک مدل شبیه‌سازی، شبیه‌سازی وضعیت موجود و مقایسه نتایج به دست آمده با اطلاعات جمع‌آوری شده از وضعیت موجود است.

در این بخش به تشریح نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی وضعیت موجود پرداخته می‌شود. مدل ساخته شده برای مدت ۳۱ روز اجرا شده است. تعداد ۶۲۶۳ واگن باری و ۱۰۱ قطار مسافری در مدت زمان اجرای مدل، وارد سیستم شدند. طول قطارهای ورودی بین ۱۸۰ تا ۱۱۰۳ متر متغیر است. طول قطارهای ورودی از آن جهت حائز اهمیت است که طول خطوط

## ۶-۲ تحلیل حساسیت بر روی تعداد لکوموتیو مانوری

یکی از تحلیل‌های مهم در مورد منابع درون ایستگاه، تحلیل منابعی نظیر لکوموتیوهای مانوری است. در این بخش با تغییر تعداد لکوموتیوهای مانوری، شاخصهای مختلفی نظیر مدت زمان حضور واگن در محوطه، زمان انتظار واگن و نرخ بهره برداری از لکوموتیوهای مانوری محاسبه شده است. با تغییر تعداد لکوموتیو مانوری از ۳ به ۴ و از ۴ به ۵ لکوموتیو و ثابت در نظر گرفتن تعداد واگن ورودی عملکرد ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۶-۲-۱ تحلیل حساسیت مدل با ثابت در نظر گرفتن

### واگنهای ورودی

در این بخش، با ثابت در نظر گرفتن نرخ واگنهای ورودی و تغییر تعداد لکوموتیو مانوری از ۳ تا ۵، نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی به دست آمده است. نتایج این بخش در جدول ۷ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ۳ لکوموتیو مانوری، نرخ بهره‌برداری از آن برابر با ۳۹٪ گردیده است. هر واگن به طور متوسط ۵۰/۶۰ دقیقه، منتظر عملیات تفکیک قطار بوده است که نشان‌دهنده کاهش ۶۵٪ زمان انتظار واگنهاست، در حالی که زمان انتظار واگن برای تشکیل قطار ۲۲۸۵/۹۳ شده است که افزایش ۳۷٪ را نسبت به شرایط فعلی نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ۴ لکوموتیو مانوری نرخ بهره‌برداری از آن برابر با ۳۰٪ گردیده است. در این حالت هر واگن به طور متوسط ۹۲/۳۵ دقیقه، منتظر عملیات تفکیک قطار بوده است که نشان‌دهنده کاهش ۷۹٪ زمان انتظار واگن نسبت به وضعیت موجود است. در حالی که زمان انتظار واگن برای تشکیل قطار ۱۹۴۴/۱۱ شده است که افزایش ۱۷٪ را نسبت به شرایط فعلی نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ۵ لکوموتیو مانوری نرخ بهره‌برداری از آن برابر با ۲۶٪ گردیده است. در این حالت، هر واگن به طور متوسط ۰۶/۳۰ دقیقه، منتظر عملیات تفکیک قطار بوده است که نشان‌دهنده کاهش ۸۳٪ زمان انتظار واگنهاست. همانطوری که در جدول ۷ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن ۳ لکوموتیو مانوری، مجموع زمان انتظار واگن افزایش یافته است، اما با بیشتر شدن تعداد لکوموتیو مانوری، این زمان کاهش پیدا کرده و در حالت ۵ لکوموتیو مانوری به ۴۱/۸۵۴ دقیقه رسیده است. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷

۱۸ گانه آپرین حداقل ۴۷۵ متر و بیشترین طول خط مربوط به خط ۵ با طول ۱۶۲۱ متر است. طول ۱٪ قطارهای ورودی بیشتر از ۱۰۵۲ متر، طول ۸٪ بیشتر از ۸۶۱ متر، طول ۱۷٪ بیشتر از ۷۷۵ متر، ۳۰٪ بیشتر از ۶۷۶ متر، ۵۶٪ بیشتر از ۵۷۸ متر و ۷۶٪ بیشتر از ۴۷۵ متر بوده است. بنابراین ۷۶٪ واگن امکان ورود به خطوط ۱۷ و ۱۸ ایستگاه را نداشته‌اند (جدول ۴).

متوسط زمان انتظار واگنهایی که منتظر انجام عملیات تفکیک در خطوط ۱۸ گانه آپرین بوده‌اند مطابق جدول ۵ است. به عنوان مثال واگنهای قطارهای ورودی خط ۱ به طور متوسط ۱۶۵/۸۸ دقیقه منتظر لکوموتیو مانوری بوده‌اند و واگنهای خط ۱۴، ۱۶۲/۵۱ دقیقه برای انجام عملیات تفکیک منتظر بوده‌اند. با توجه به مقاصد تخصیص داده شده، واگنهای خط ۲، کمترین زمان انتظار را برای تفکیک قطار داشته‌اند. هر واگن به طور متوسط ۱۷۳/۲۶ دقیقه، منتظر انجام عملیات تفکیک بوده است.

مدت زمانی که واگن برای رسیدن به تعداد کافی و تشکیل قطار صرف می‌کنند برای خطوط هجده گانه ایستگاه آپرین در جدول ۶ ارائه شده است. به عنوان مثال زمان انتظار واگن برای تشکیل قطار در خط ۴ برابر با ۱۶۵۱/۹۸ دقیقه بوده است. با توجه به مقاصد تخصیص داده شده، واگن در خطوط ۵ و ۱۴ کمترین زمان انتظار را برای تشکیل قطار صرف کردند که به دلیل وجود واگنهای بیشتر به مقصد تخصیص داده شده به این خطوط است. هر واگن به طور متوسط ۵۰/۲۹۳۹ دقیقه، برای تشکیل قطار در ایستگاه منتظر بوده است.

در وضعیت فعلی، نرخ بهره‌برداری از لکوموتیو مانوری برابر با ۶۴٪ بوده است. براساس مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج موجود و اطلاعات واقعی جمع‌آوری شده از ایستگاه آپرین، نتایج نشان‌دهنده اعتبار مدل ساخته شده است. اطلاعات مربوط به نرخ ورودی قطارها و واگن با دقت بیشتر از ۹۵٪ با اطلاعات وضعیت موجود انطباق دارند. با بررسی انجام شده بر روی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ مدل شبیه‌سازی، تعداد واگنهای لازم برای تشکیل قطار، قسمتی از زمان مانور و متوسط زمان بازرسی برای هر واگن، بیشترین تغییر را در پاسخ مدل ایجاد می‌کند که به دلیل مرتبط بودن با لکوموتیو مانوری و زمان مانور بیشترین اثر را بر روی عملکرد ایستگاه خواهد گذاشت.

ورودی ثابت به محوطه مانوری، با کاهش زمان انتظار برای لکوموتیوهای مانوری، به دلیل نبودن تعداد کافی واگنهای ورودی هم مقصد برای تشکیل قطار، میانگین زمان توقف برای تشکیل قطار افزایش پیدا کرده و در نتیجه زمان حضور واگنها در محوطه مانوری افزایش پیدا کرده است.

نشان داده شده است، با ثابت در نظر گرفتن نرخ واگنهای ورودی و با افزایش تعداد لکوموتیوهای مانوری، نرخ بهره‌برداری و میانگین زمان انتظار برای انجام عملیات تفکیک قطار کاهش پیدا کرده است. اما نکته قابل توجه این است که با در نظر گرفتن تعداد واگن

جدول ۵. متوسط زمان انتظار واگنها برای تفکیک قطار

شماره خط	حداکثر زمان انتظار (دقیقه)	متوسط زمان انتظار (دقیقه)	شماره خط	حداکثر زمان انتظار (دقیقه)	متوسط زمان انتظار (دقیقه)
خط ۱	۸۲۱/۳۳	۱۶۵/۸۸	خط ۹	۷۴۴/۸۴	۱۷۹/۳۲
خط ۲	۱۱۴/۷۱	۶۱/۸۱	خط ۱۰	۷۰۴/۳۴	۱۸۳/۸۳
خط ۳	۲۲۳/۰۸	۹۲/۷۱۶	خط ۱۱	۶۲۴/۳۱	۱۶۵/۲۶
خط ۴	۵۶۲/۸۲	۱۸۱/۱۷	خط ۱۲	۸۱۴/۳۳	۱۷۱/۳
خط ۵	۶۶۹/۶۴	۱۸۶/۴۳	خط ۱۳	۵۹۹/۰۱	۱۲۰/۱۱
خط ۶	۶۷۵/۱۴	۱۶۳/۱	خط ۱۴	۷۴۸/۸۳	۱۶۲/۵۱
خط ۷	۶۵۵/۶۴	۲۰۰/۲۸	خط ۱۵	۶۹۰/۶۴	۲۱۸
خط ۸	۶۸۹/۱۴	۱۵۸/۳۷	خط ۱۶	۵۱۶/۴۷	۱۷۶/۵۵

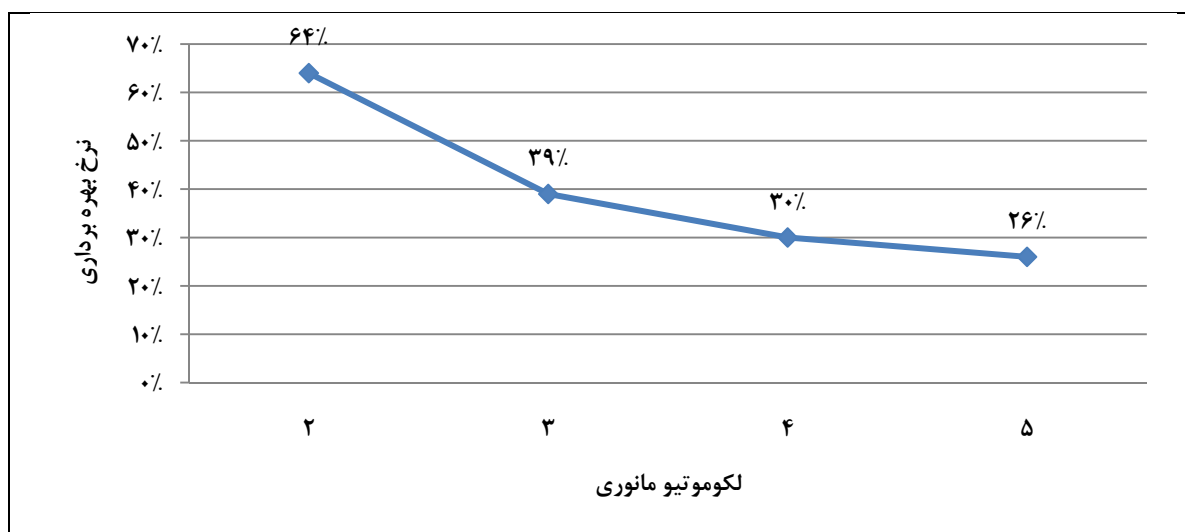
جدول ۶. متوسط زمان انتظار واگنها برای تشکیل قطار

شماره خط	حداکثر زمان انتظار (دقیقه)	متوسط زمان انتظار (دقیقه)	شماره خط	حداکثر زمان انتظار (دقیقه)	متوسط زمان انتظار (دقیقه)
خط ۱	۶۳۶۵/۶۴	۶۴۱/۸۰	خط ۱۰	۵۸۲۸/۴۵	۷۲۸/۰۲
خط ۲	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰	خط ۱۱	۱۱۳۳۵/۲۵	۲۱۲۷/۲۱
خط ۳	۵۲۶۹/۲۹	۴۴۳۳/۰۷	خط ۱۲	۵۵۱۲/۷۳	۹۷۱/۸۹
خط ۴	۴۴۰۹/۸۶	۱۶۵۱/۹۸	خط ۱۳	۱۸۳۶۵/۴۷	۱۶۰۴/۸۷
خط ۵	۸۰۶۴/۰۰	۴۵۸/۰۰	خط ۱۴	۲۳۵۰۶/۸۸	۶۲۶/۲۸
خط ۶	۴۰۵۲/۰۱	۸۵۳/۶۸	خط ۱۵	۹۰۳۹/۰۲	۱۹۱۵/۳۶
خط ۷	۶۴۲۱/۰۶	۱۰۸۶/۳۶	خط ۱۶	۱۶۳۴/۹۵	۶۶۲/۷۹
خط ۸	۱۸۳۴۶/۹۹	۵۷۳۳/۷۹	خط ۱۷	۶۳۸۴/۵۰	۳۱۸۱/۹۰
خط ۹	۶۵۱۵/۳۸	۸۹۶/۰۴	خط ۱۸	۴۵۹۹/۵۴	۷۷۶/۴۲

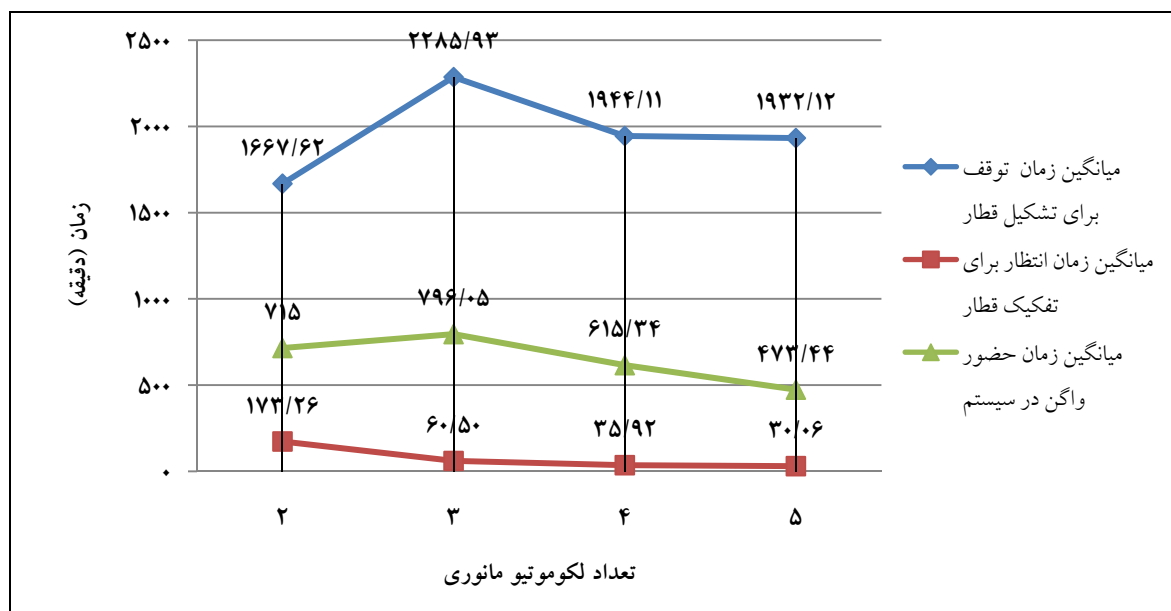


جدول ۷. تحلیل حساسیت بر روی تعداد لکوموتیو مانوری با ثابت در نظر گرفتن نرخ واگنهای ورودی

تعداد لکوموتیو مانوری	نرخ بهره برداری (درصد)	میانگین زمان توقف برای تشکیل قطار (دقیقه)	میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطار (دقیقه)	میانگین زمان حضور واگن در سیستم (دقیقه)	مجموع زمان انتظار واگنها (دقیقه)
۲	۶۴٪	۱۶۶۷/۶۲	۱۷۳/۲۶	۷۱۵	۷۱۰۸/۵۰
۳	۳۹٪	۲۲۸۵/۹۳	۶۰/۵۰	۷۹۶/۰۵	۸۸۵۰/۹۳
۴	۳۰٪	۱۹۴۴/۱۱	۳۵/۹۲	۶۱۵/۳۴	۷۴۷۱/۷۴
۵	۲۶٪	۱۹۳۲/۱۲	۳۰/۰۶	۴۷۳/۴۴	۴۸۵۴/۴۱



شکل ۶. تغییرات نرخ بهره‌برداری بر حسب تعداد لکوموتیو مانوری



شکل ۷. نتایج مدل شبیه‌سازی با ثابت در نظر گرفتن نرخ واگنهای ورودی و با افزایش تعداد لکوموتیوهای مانوری

۲-۲-۶ ارزیابی حالت‌های مختلف

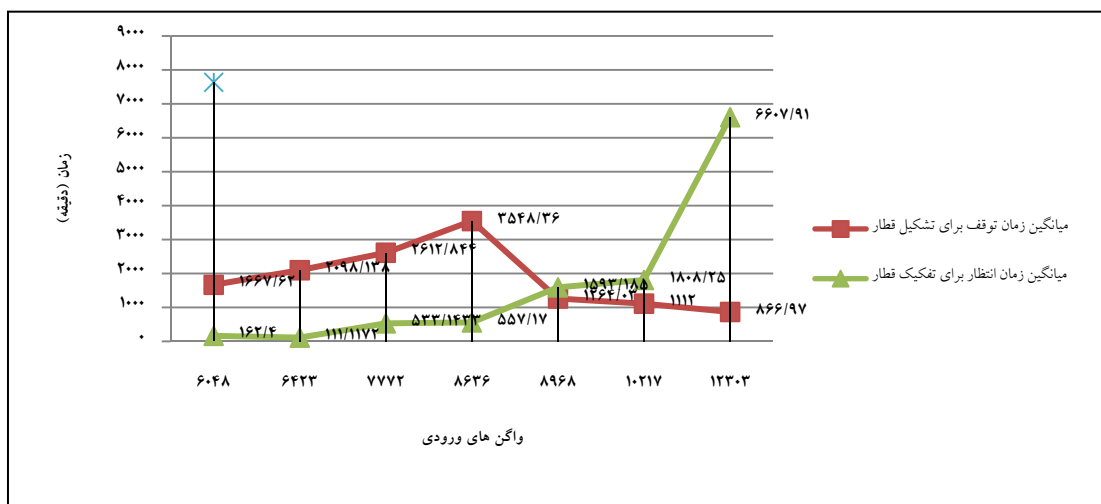
در این قسمت، با ثابت در نظر گرفتن لکوموتیوهای مانوری، تعداد واگنهای ورودی را افزایش می‌دهیم. با افزایش تعداد واگنهای ورودی، نرخ بهره‌برداری افزایش می‌یابد. میانگین زمان حضور واگن در سیستم، ابتدا افزایش، سپس کاهش و در نهایت سیر صعودی به خود می‌گیرد که به دلیل تأثیر همزمان زمان تفکیک و تشکیل قطار است. میانگین زمان انتظار واگن برای تفکیک، با افزایش تعداد واگن‌ها همواره سیر صعودی داشته است و پس از رسیدن تعداد واگنهای ورودی به بیش از ۱۰۰۰۰ واگن در مدت زمان مشخص، چندین برابر می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، میانگین زمان توقف برای تشکیل قطار، با توجه به تعداد واگنهای ورودی ابتدا افزایش و پس از رسیدن به حدود ۸۶۰۰ واگن، با توجه به وجود تعداد بیشتر واگنهای مقاصد مختلف برای تشکیل قطار، سیر نزولی به خود می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، با رسیدن تعداد واگنهای ورودی به ۱۲۳۰۰ واگن و با در اختیار داشتن ۲ لکوموتیو مانوری، نرخ بهره‌برداری به ۱ می‌رسد. محوطه مانوری با افزایش تعداد لکوموتیوهای مانوری، قادر به سرویس‌دهی به تعداد بیشتری واگن خواهد بود، بنابراین تعداد به ۱۴۰۰۰ واگن برای ۳ لکوموتیو مانوری، ۱۸۰۰۰ واگن برای ۴ لکوموتیو مانوری و در نهایت به ۲۵۰۰۰ واگن برای ۵ لکوموتیو مانوری می‌رسد.

همچنین میانگین مدت زمان حضور واگن در سیستم، بر اساس تعداد لکوموتیوهای مانوری و تعداد واگنهای ورودی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. آنچه در شکل ۱۰ مشهود است این است که با توجه به تعداد مشخص لکوموتیو مانوری با رسیدن تعداد واگنهای ورودی به مقداری مشخص، مدت زمان حضور

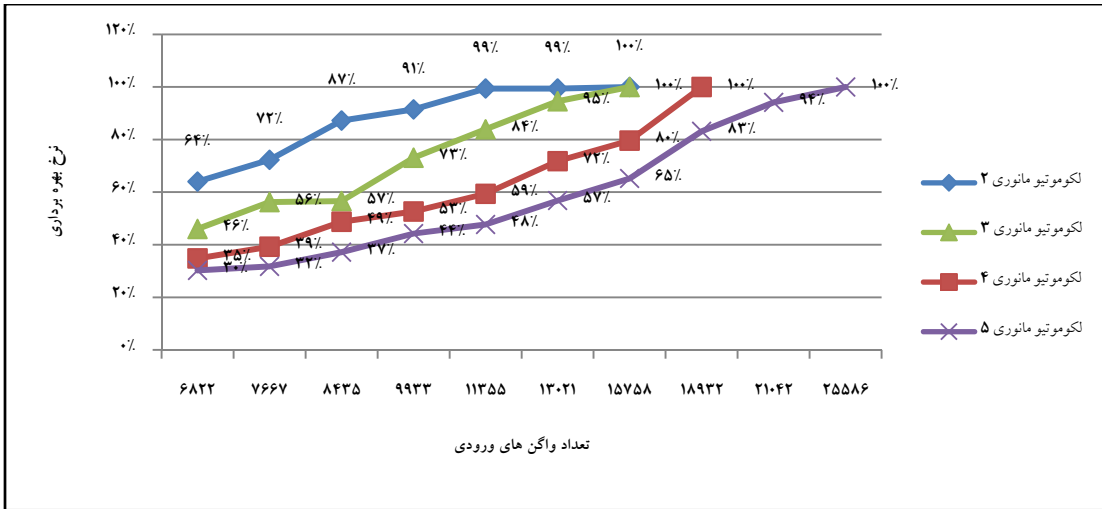
واگن‌ها در سیستم به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطارهاست. این شکل همچنین نشان دهنده تأثیر قابل توجه تعداد لکوموتیوهای مانوری، بر مدت زمان حضور واگن در سیستم است. این تأثیر با افزایش تعداد لکوموتیوهای مانوری به ۵ قابل توجه است. افزایش، کاهش و سپس افزایش مدت زمان حضور واگن‌ها در سیستم، به دلیل تأثیر همزمان میانگین زمان انتظار برای تفکیک و میانگین زمان انتظار برای تشکیل قطارهاست.

در شکلهای ۱۱، ۱۲، ۱۳ تغییرات میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطار، میانگین زمان انتظار برای تشکیل قطار، مجموع زمان انتظار واگن‌ها، بر اساس تعداد واگنهای ورودی نشان داده شده است. میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطار و مجموع زمان انتظار واگن‌ها به صورت صعودی افزایش می‌یابند، اما این رشد با رسیدن به تعداد خاصی از واگن‌ها رشد چشمگیری خواهد داشت. اما میانگین زمان انتظار برای تشکیل قطار، در ابتدا رفتار نوسانی دارد، اما با رسیدن به تعداد خاصی از واگن، این مدت زمان کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در زمانی که از ۴ لکوموتیو مانوری استفاده می‌شود، تا رسیدن به تعداد مشخصی از واگن‌ها بین زمانهای توقف برای تفکیک و تشکیل یک تعادل نسبی وجود دارد. اما در یک تعداد مشخصی از واگن‌ها این تعادل به هم خورده و زمان انتظار برای تشکیل قطارها افزایش می‌یابد. این امر برای تعداد لکوموتیوهای ۲ و ۳ به دلیل کمتر بودن ظرفیت این لکوموتیوها از حجم عملیات مورد نیاز و همچنین برای تعداد ۵ لکوموتیو به دلیل بالا بودن ظرفیت عملیات مانور این تعداد لکوموتیو، نوسانات وجود داشته ولی به اندازه ۴ لکوموتیو نبوده است.

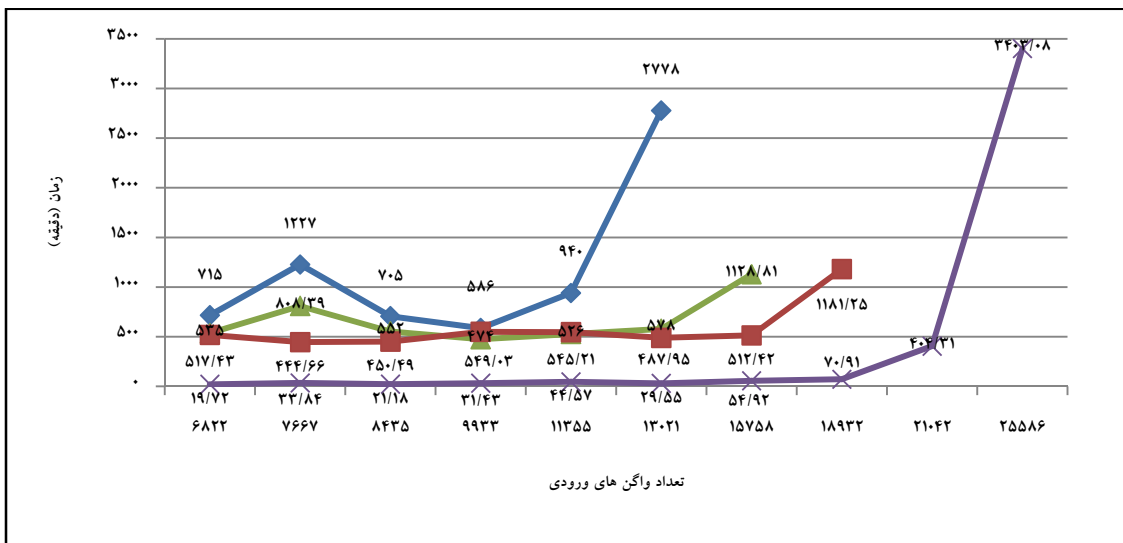


شکل ۸ تحلیل حساسیت بر اساس تعداد واگن ورودی

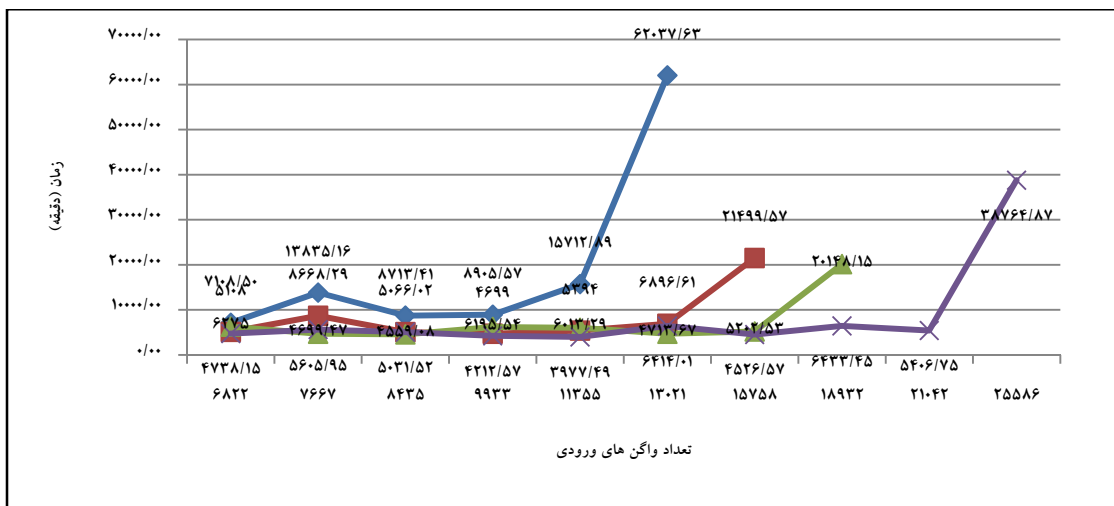
تجزیه و تحلیل عملکرد محوطه مانوری آپرین ...



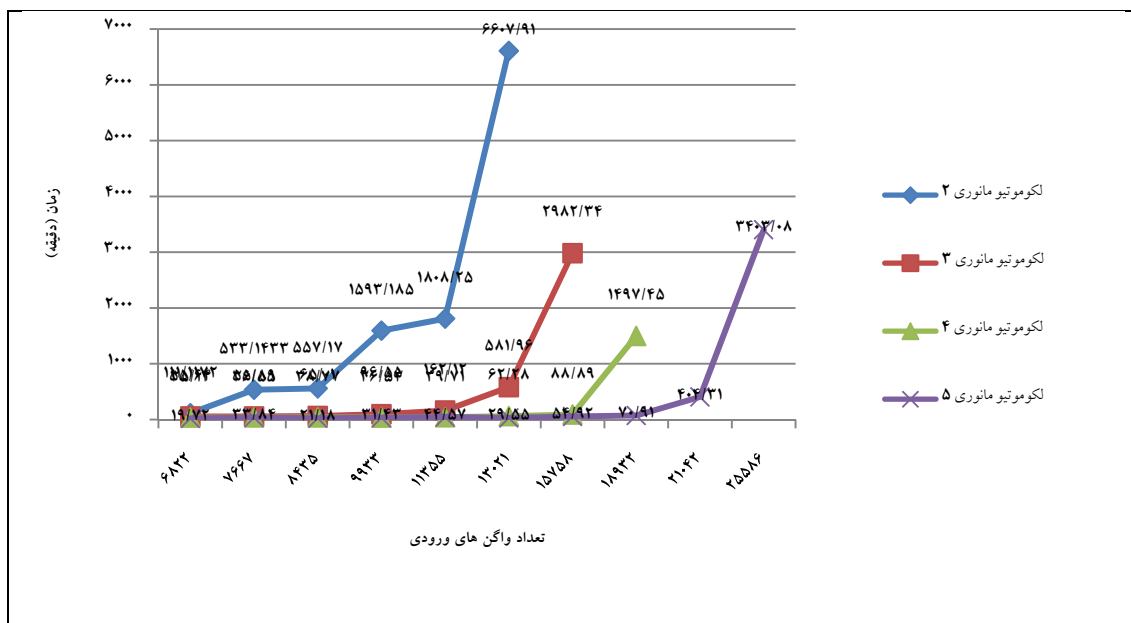
شکل ۹. نرخ بهره‌برداری لکوموتیو مانوری



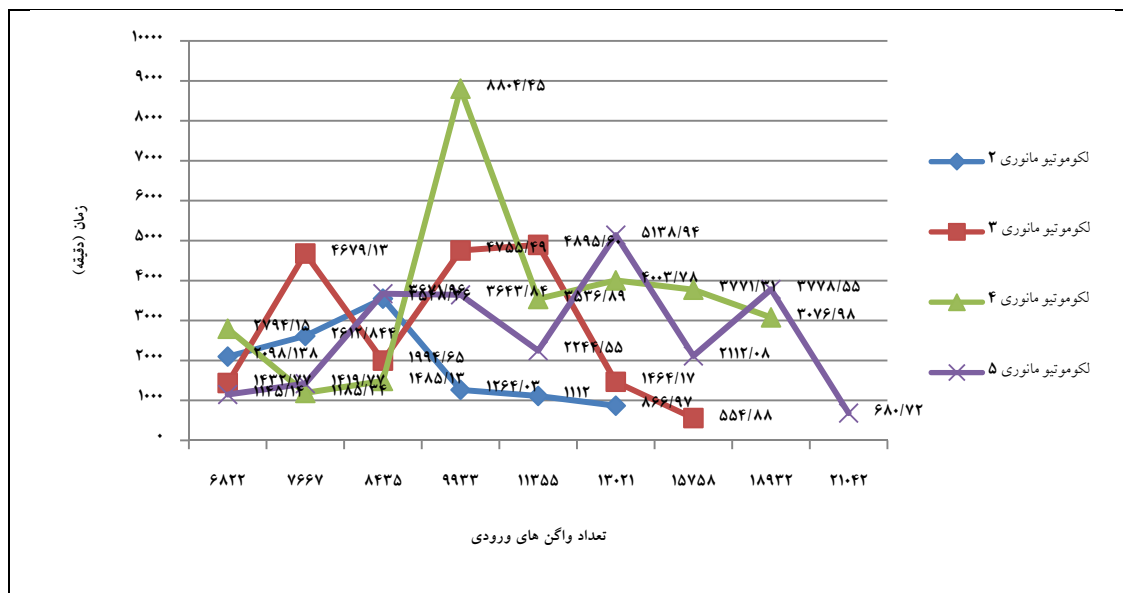
شکل ۱۰. میانگین زمان حضور واگن در سیستم



شکل ۱۱. مجموع زمان انتظار واگنها



شکل ۱۲. میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطار



شکل ۱۳. میانگین زمان انتظار برای تشکیل قطار

تفکیک و به طور متوسط ۲۹۳۹/۵۰ دقیقه، برای تشکیل قطار در ایستگاه منتظر بوده‌اند. نرخ بهره‌برداری از لکوموتیو مانوری در محوطه مانوری آپرین برابر با ۶۴ درصد بوده است. با ثابت در نظر گرفتن نرخ واگنهای ورودی و با افزایش تعداد لکوموتیوهای مانوری، نرخ بهره‌برداری و میانگین زمان انتظار برای انجام عملیات تفکیک قطار کاهش پیدا کرده است، اما

## ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار در ایران، یک مدل شبیه‌سازی برای یک محوطه مانوری مسطح ارائه شده است. در مدل ارائه شده، عملیات محوطه مانوری آپرین شامل فرآیندهای قبول، تشکیل، تغییر آرایش، اعزام قطارها و گروه‌بندی واگنها به منظور تحلیل عملکرد منابع موجود شبیه‌سازی شده است. در وضعیت فعلی، واگنها به طور متوسط ۱۷۳/۲۶ دقیقه، منتظر انجام عملیات

- Bektas, T. (2009) "Improving the performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 17, Issue 3.
- Broek, J. (2007) "A capacity test for shunting movements", *Springer, Computer Science*, Vol. 4359, pp. 108-125.
- Kelton, D., Sadowsky, R. and Sturrok, D. (2003) "Simulation with Arena", 3<sup>rd</sup>. edition, New York: McGraw-Hill.
- Daganzo, C. F., Dowling, R. G. and Hall, R. W. (1983) "Railroad classification yard throughout: The case of multistage triangular sorting", *Transportation Research*, Vol. 17, pp. 95-106.
- Dahlhaus, E., Miller, F., Manne, M. and Ryan, J. (2000) "Algorithms for combinatorial problems related to train marshalling", In *Proceedings of AWOCA 2000*, In Hunter Valley, pp. 7-16.
- Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M., and Ryan, J. F. (2000) "The train marshalling problem", *Sciedirect, Discrete Applied Mathematics*, Vol. 103, Issue 1-3, pp. 41-54.
- Dong, Y. (1997) "Modeling rail freight operations under different operating strategies", *Massachusetts Institute of Technology, Ph.D. Dissertation*, pp. 212-220.
- Dirmberger, J. R. and Barkan, C. P. L. (2007) "Lean railroading for improving railroad classification terminal performance", *Journal of Transportation Research Board*, No. 1995, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C. , pp. 52-61.
- Guignard, M. and Kraft, E. (1993) "A mixed-integer optimization model to improve freight car classification in railroad yards", *Decision Sciences Report* 93-06-06.
- He, S., Song, R. and Hu, A. (1997) "Optimal computer – aided dispatching model of decision support system in railyards", *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, October 28-31, Beijing, China, pp. 1546-1550.
- He, S. R. and Chaudhry, S. S. (2000) "Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations", *European Journal of Operational Research*, Vol. 124, No. 2, 16 July 2000, pp. 307-331.

میانگین زمان توقف برای تشکیل قطار افزایش یافته و در نتیجه زمان حضور واگنها در محوطه مانوری افزایش پیدا کرده است. با ثابت در نظرگرفتن لکوموتیوهای مانوری و افزایش تعداد واگنهای ورودی، نرخ بهره‌برداری افزایش می‌یابد. میانگین زمان حضور واگن در سیستم، ابتدا افزایش، سپس کاهش و در نهایت سیر صعودی به خود می‌گیرد. میانگین زمان انتظار برای تفکیک قطار و مجموع زمان انتظار واگنها به صورت صعودی افزایش می‌یابند. اما میانگین زمان انتظار برای تشکیل قطار، در ابتدا رفتار نوسانی دارد اما با رسیدن به تعداد خاصی از واگنهای ورودی، این مدت زمان کاهش می‌یابد. مدل شبیه‌سازی ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزار قدرتمندی برای ارزیابی عملکرد محوطه‌های مانوری، مورد استفاده قرار بگیرد و به تصمیم‌گیری در خصوص افزایش امکانات و تجهیزات محوطه‌های مانوری کمک شایانی نماید.

## ۸. پی‌نوشتها

1. Flat Yard
2. Hump Yard
3. Gravity Yard
4. Classification (Class) Tracks
5. Classified
6. Blocking
7. Static capacity
8. Practical static capacity
9. Dynamic capacity
10. Union Pacific Railroad
11. Input analyzer

## ۹. مراجع

- آذری، خسرو (۱۳۸۷) "مقدمه‌ای بر طراحی ایستگاه راه آهن"، ایران: انتشارات بیشه.
- بنکس، جری و جان، کارسون (۱۳۸۸) "شبیه‌سازی سیستمهای گسسته - پیشامد"، ترجمه هاشم محلوچی، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، انتشارات علمی.
- راه آهن جمهوری اسلامی ایران (۱۳۸۷) "مقررات عمومی حرکت"، ایران: انتشارات راه آهن جمهوری اسلامی ایران.
- یقینی، مسعود و لسان، جواد (۱۳۸۹) "برنامه‌ریزی عملیات حمل و نقل ریلی"، ایران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Fogliatti de Sinay, M.C. and Delgado de Oliveira, G. (2008) "Railroad yards logistic to improve capacity", International Conference on Industrial Logistics, March 9-15, 2008, Logistics in a Flat World: Strategy, Management and Operations.
- Turnquist, M. A. and Daskin, M. S. (1982) "Queuing models of classification and connection delay in railyards", Transportation Science, Vol. 16, pp. 207-230.
- White, T. (2003) "Elements of train dispatching, Vol. 1: England, VTD RAIL Publication.
- Washington State Transportation Commission (2006) "Statewide rail capacity and system needs study", Technical Memorandum.
- Yagar, S., Saccomanno, F. F., and Shi, Q. (1983) "An efficient sequencing model for humping in a rail yard", Transportation Research Part A: General, Vol. 17, Issue 4, July 1983, pp. 251-262.
- Yin, Yong (2007) "Study on classification of marshalling station based on fuzzy clustering analysis", International Conference on Transportation Engineering, Conference Proceeding, pp. 2465-2470.
- Jacob, R. (2007) "Multistage methods for freight train classification", 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization and Systems, ATMOS 2007, pp. 158-174
- Low, A. M. and Kelton, W. D. (1991) "Simulation modeling and analysis", Third edition, McGraw-Hill.
- Malay, A., Dalaland, L. and Jensen, P. (2001) "Simulation modeling at Union Pacific Railroad", Proceedings of the Winter Simulation Conference.
- Marinov, M. and Viegas, J. (2009) "A simulation modeling methodology for evaluating flat-shunted yard operations", Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 17, Issue 6, pp. 1106-1129.
- Marinov, M. (2007) "A simulation modeling methodology for analyzing yard operations", Mechanics Transportation Communications, Issue 3.
- Rizzoli, A., Fornara, E. N. and Gambardella, L.M. (2002) "A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 59, Issue 1-3, pp. 57-71.