ارائه مدل شبیه‌ساز جهت محاسبه پارامترهای حرکت قطارها با رعایت جزییات فنی مسیر و ناوگان، مثال موردی مسیر تهران- مشهد

مسعود شکیبایی(مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

عبدالرضا شیخ الاسلامی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

نریمان نیکو، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سمانه کوچکی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سید محسن برهانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: m_shakibayi@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۰۹ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۰۱

چکیده:

با توجه به توسعه راه‌آهن و یا اعمال تغییراتی مانند احداث یا تغییر هندسی مسیر، استفاده از ناوگان پیشرفته، تغییر تعداد واگن قطار و سایر مواردی که ممکن است به مراتب رخ دهند، حمل‌ونقل ریلی باید بتواند نسبت به این تغییرات انعطاف لازم و امکان پیش بینی های مورد نیاز را داشته باشد. این پژوهش تلاشی است برای ارائه ابزاری که بتواند با در نظر گرفتن جزییات حرکت قطارها، اجازه ارزیابی عملکرد سیستم پیش از پدید آمدن آن را بدهد. ابزار ارائه شده بر اساس مدل شبیه‌سازی پویا، واقعه پایه است که در محیط C# تهیه شده و به تعیین پارامترهای حرکت یک قطار مسافری و یا باری در مسیر می‌پردازد. از خروجی‌های مساله می‌توان به زمان سیر قطار در بلاک‌ها و مسیر، محاسبه مصرف سوخت، سرعت و شتاب متوسط و لحظه‌ای قطار، نیروی کشش لحظه‌ای قطار و دیاگرام مقاومت‌های حرکت قطار با در نظر گرفتن جزییات فنی آلات ناقله و هندسه مسیر، اشاره کرد. مدل شبیه‌ساز ارائه شده در این تحقیق نسبت به سایر مدل‌های بکار رفته در نرم‌افزارهای خارجی، در بخش گام‌های سرعت، محاسبه سرعت عملیاتی، محاسبه مصرف سوخت، زبان برنامه‌نویسی و همچنین روابط بکار رفته در محاسبه مقاومت و نیروی کشش دارای تفاوت‌هایی است که از نوآوریهای این تحقیق است. در آزمون‌ها با استفاده از نظرات کارشناسی و همچنین آزمون‌های فرضیه مبتنی بر مقایسه نتایج شبیه‌سازی و واقعیات، نتایج آزمونها بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین نتایج مدل شبیه‌سازی و واقعیت مشاهده شده بود. برای مثال موردی، پارامترهای مسیر تهران مشهد محاسبه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای حرکت قطارها، مدل شبیه‌سازی، راه‌آهن ایران، زمان سفر، مصرف سوخت.

۱. مقدمه

حمل‌ونقل ریلی به دلیل بالا بودن ایمنی و مقرون به صرفه بودن و سایر مزایای آن، مورد توجه مسافران و صاحبان کالا قرار دارد و از اهمیت بسیاری برخوردار است. چنین به نظر می‌رسد که در صورت داشتن یک سیستم حمل‌ونقل ریلی کارآمد، سریع، ایمن و با قابلیت اطمینان بالا، استقبال از این سیستم بسیار بیشتر از سطح فعلی خواهد بود. این مهم با گسترش صنعت حمل‌ونقل ریلی در دو بخش صورت خواهد گرفت. اول با توسعه سیستم سخت‌افزاری همچون توسعه خطوط، توسعه ناوگان و افزایش خدمات رفاهی در این بخش و دوم با افزایش ابزارهای نرم‌افزاری و مدیریتی در هدایت این سیستم گسترده به سوی افزایش قابلیت اطمینان و اتخاذ تصمیمات سیستماتیک از سوی مدیران این بخش. با توجه به اینکه حرکت قطارها فرآیندی پیچیده است که بر پایه مدیریت واکنش متقابل میان تعداد زیادی از اجزاء متأثر از هم صورت می‌پذیرد، به نظر می‌رسد تاکنون پژوهشی جامع که بتواند نیازهای مدیران برای تصمیم سازی با توجه به شرایط ایران را مدنظر قرار دهد، انجام نشده است. نرم‌افزار شبیه‌سازی که در این تحقیق ارائه می‌شود، یکی از ابزارهایی است که می‌تواند بدون ایجاد روش‌های سعی و خطا سیستم را مدل کرده و داده‌های موردنیاز برای اتخاذ تدابیر را فراهم سازد. مدل ارائه‌شده با رویکرد شبیه‌سازی تهیه شده است، زیرا شبیه‌سازی اجازه ارزیابی عملکرد اجرایی را پیش از پدید آمدن سیستم می‌دهد، مقایسه گزینه‌های اجرایی گوناگون را بدون ایجاد اختلال در سیستم واقعی میسر می‌کند، فشرده‌سازی زمان را به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های بموقع مجاز می‌دارد و سرانجام اینکه، به دلیل ساختار آسان خود و دسترس پذیری زبانهای رایانه‌ای ویژه شبیه‌سازی، بسیاری از افراد می‌توانند از آن استفاده کنند. مدل شبیه‌سازی ارائه شده بر اساس مدل پویا[1]، واقعه پایه[2] است و به منظور افزایش کارآیی و بهبود سرعت پردازش نرم‌افزار و از طرفی پرداختن به جزییات لازم و حذف جزییات غیرضروری، نرم‌افزار با تلفیق دو حالت ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک عمل می‌کند. نرم‌افزار قادر خواهد بود اطلاعات ورودی مشخصات هندسی مسیر شامل بلاک‌ها و ایستگاه‌ها، مشخصات فنی لکوموتیو و واگن‌ها، مشخصات فنی قطارها، روابط نیروی کشش و مقاومت‌ها و همچنین علائم مسیر را برای قطارهای باری و مسافری دریافت و خروجی‌هایی مانند زمان سیر قطار در بلاک و کل مسیر، میزان مصرف سوخت، سرعت لحظه‌ای و متوسط قطار، نیروی کشش لحظه‌ای قطار و دیاگرام مقاومت‌های پیش روی حرکت قطار (شامل مقاومت قوس، شیب و فراز، تونل، مقاومت دیویس)، ارائه کند. با توجه به اطلاعات موجود در شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران سعی شده است فرم‌های ورودی نرم‌افزار به نحوی باشد که امکان استفاده از اطلاعات موجود به سرعت مقدور باشد. هرچند تاکنون نرم‌افزارهایی به این منظور در سایر کشورها تهیه و ارائه شده است، ولی در این نرم‌افزار سعی شده است مشکلات نرم‌افزارهای قبلی رفع شده و برای استفاده در راه‌آهن ایران مناسب باشد.

۲. مرور ادبیات موضوع

فن شبیه‌سازی برای حل بسیاری از مسائل بزرگ و پیچیده مناسب است و در صنعت راه‌آهن برای طیف وسیعی از کاربردها مانند تهیه زمان‌بندی یا در نظر گرفتن تغییرات زیرساخت مورداستفاده قرار می‌گیرد. این روش امکان ارزیابی سیستم، قبل از ایجاد آن را میسر می‌سازد و در نهایت با توجه به ساختار آن و در دسترس بودن زبانهای مختلف رایانه ای که صرفاً برای شبیه‌سازی تهیه شده‌اند، امکان مقایسه سیستم‌های مختلف بدون تداخل با سیستم واقعی را مهیا می‌سازد. هرچند سیستم‌های شبیه‌سازی پیچیده‌اند و نیاز به اطلاعات زیادی دارند، اما در عمل با توجه به توانایی در لحاظ جزییات، کاربرد وسیعی دارند [Hansen, Pachl and

[Kelton and Sadowski, 2002]، [Albrecht, 2008]. برخی نرم‌افزارهای چند منظوره مانند Multi-RailSys، VISION Rail و OpenTrack همچنان به طور وسیعی استفاده می‌شوند و در آنها حرکت قطارها شبیه‌سازی شده و اطلاعاتی مانند تأخیر محاسبه می‌شود[Abril et al. 2008]. مارینو و ویگاس یک مدل شبیه‌سازی میکروسکوپیک ماکروسکوپیک برای مطالعه و ارزیابی بهره‌برداری قطارهای باری در شبکه ریلی توسعه دادند. آنها در مدل شبیه‌سازی واقعه پایه، شبکه ریلی را به اجزای آن مانند خطوط، ایستگاه، محوطه و گره‌ها تقسیم‌بندی کرده و سپس کلیه این اجزا را به صورت سیستم صف به هم پیوسته در نظر گرفتند[Marinov and Viegas, 2011]. ورمنس و همکاران دریافتند محاسبه قابلیت اطمینان حرکت قطارها در شبکه‌های پیچیده بسیار دشوار است، زیرا اتفاقات بسیاری موجب اغتشاش و توسعه تأخیر در زمان و مکان می‌شود. آنها سعی کردند قابلیت اطمینان حرکت قطارها را به وسیله کاهش وابستگی قطارها به یکدیگر و همچنین کاهش زمان سیر قطارها، افزایش دهند. با توجه به پیچیدگی مسئله، آنها از روش شبیه‌سازی شبکه استفاده کردند[Vromans, Dekker and Kroon, 2006]. اسچلچت از یک شیوه پایین به بالا، بر مبنای شبیه‌سازی و به منظور ساده‌سازی شبکه ریلی استفاده کرد. او با هدف بیشینه کردن تعداد قطارهای اعزامی، از یک مدل جزءنگر میکروسکوپیک آغاز کرد و سپس با استفاده از یک الگوریتم پیشنهادی، شبکه را به یک سطح یکپارچه تبدیل کرد که قابلیت بهینه‌سازی داشت. هدف او بیشینه کردن تعداد قطارهای اعزامی بود. در مرحله بعد او زمان‌بندی بهینه‌سازی شده را مجدداً به حالت میکروسکوپیک تبدیل کرد[Schlechte et al. 2011] . یالچینکایا و بیحان موضوع تعیین زمان‌بندی حرکت قطارها را با در نظر گرفتن محدودیت‌های حرکتی و با فرض رعایت ظرفیت مسیر مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها دستیابی به برنامه زمان‌بندی امکان‌پذیر برای کلیه قطارهای شبکه است که زمان اعزام از مبدأ و رسیدن قطارها به مقصد و همچنین کل زمان سیر قطارها را شامل می‌شود. آنها یک مدل شبیه‌سازی تصادفی امکان‌پذیر را توسعه دادند که می‌توانست زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها و همچنین زمان‌بندی اعزام را نیز محاسبه کند[Yalçınkaya and Bayhan, 2012]. سالیدو و همکاران برای یک مسیر یک خطه، روشی را به منظور تعیین میزان استواری برنامه از دیدگاه بهره‌بردار و با روش‌های مخلوط ریاضی و شبیه‌سازی ارائه کردند. آنها فرمول‌هایی برای اندازه‌گیری میزان استواری ارائه دادند و یک نرم‌افزار نیز به این منظور و برای ارزیابی میزان استواری زمان‌بندی توسعه دادند[Salido, Barber and Ingolotti, 2012]. لی و گائو معادله‌ای از حرکت قطارها در سیستم بلاک متحرک معرفی کردند که میزان فاصله توقف ایمن و موقعیت ایستگاه‌ها هنگامی که تعداد زیادی قطار در مسیر باشد را تعیین می‌کرد. آنها یک دیاگرام مکان- زمان ارائه کردند و به منظور تست مدل توسعه داده شده از روش شبیه‌سازی استفاده کردند[Li and Gao, 2007]. لیو و گولویچر روشی بر مبنای الگوریتم محاسباتی به منظور محاسبه میزان سوخت کافی ارائه کردند و در این راستا نرم‌افزاری را توسعه دادند[Liu and Go-lovitcher, 2003]. ادینولفی و همکاران، میزان تأثیر نوع ترمز بر میزان مصرف سوخت را محاسبه کرده و میزان صرفه‌جویی سوخت در مسیر برقی ایتالیا را نشان دادند[Adinolfi et al. 1998]. یقینی و محمدزاده مدل زمان‌بندی حرکت قطارها را در مسیر دوخطه با هدف کاهش مجموع تاخیرات را به دست آوردند. روش آنها می‌توانست زمان و مکان مناسب برای اقامه نماز را نشان دهد[Yaghini and Mohammadzade, 2011]. روشی که چورير و همکاران ارائه کردند، تولید یک جواب به منظور بهینه کردن زمان سفر و میزان مصرف سوخت بود که آنها در روش خود از محاسبه دیاگرام سرعت حرکت قطارها در مسیر استفاده کردند. مدل ارائه شده یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه است و سرعت سیر

را به عنوان متغیر تصمیم در نظر می‌گیرد[Chevrier, Pellegrini and Rodriguez, 2013]. بوکر و سیبولد یک روش محاسباتی به منظور تعین میزان گسترش تأخیر در مسیرهای اصلی بر مبنای شبیه‌سازی مونت کارلو و با استفاده از گراف فعالیت (activity graph) پیشنهاد کردند[Büker and Seybold, 2012]. تحقیق دیگری به بررسی اثر قابلیت اطمینان زمان سفرهای مسافری ریلی با استفاده از شبیه‌سازی می‌پردازد[van Loon, Rietveld and Brons, 2011]. یانگ به بررسی مدلی ریاضی برای یافتن بهترین روش اعزام قطارها با توجه به محدودیت‌های عملیاتی می‌پردازد. او دو هدف اصلی را دنبال می کند: اول فرموله کردن یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سخت با هدف یافتن راهبرد بهینه کنترل و دوم یافتن شیوه جستجوی یک راهبرد کنترلی با کیفیت تحت مفروضات شبکه برای ترکیبی از قطارها با توجه به محدودیت‌های عملیاتی است. تابع هدف این مقاله بهینه‌سازی زمان سفر و مصرف انرژی است[Yang, 2012]. در کشور ایران نیز مطالعات متنوعی با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده است که می‌توان به نرم‌افزار تهیه شده توسط صادقی با هدف تعیین قابلیت اطمینان حرکت قطارها در محیط نرم‌افزار VB اشاره کرد. از دیگر نرم‌افزارهایی که با رویکرد شبیه‌سازی تهیه شده است می‌توان به Train 98 و همچنین برنامه محاسبه زمان سیر قطارها اشاره کرد که در گذشته توسط اداره کل نیروی کشش راه‌آهن تهیه شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان باید به این نکته اشاره کرد که نرم‌افزارهای تهیه شده نتوانسته‌اند در راه‌آهن ایران کاربردی شوند.

۳. ارائه مدل شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی قادر خواهد بود اطلاعات ورودی شامل مشخصات هندسی مسیر شامل بلاک‌ها و ایستگاه‌ها، مشخصات فنی لکوموتیو و واگن‌ها، مشخصات فنی قطارها، روابط نیروی کشش و مقاومت‌ها و همچنین علائم مسیر را دریافت و خروجی‌هایی مانند زمان سیر قطار در بلاک و کل مسیر، میزان مصرف سوخت، سرعت لحظه‌ای و متوسط قطار، نیروی کشش لحظه‌ای قطار و دیاگرام مقاومت‌های پیش روی حرکت قطار (شامل مقاومت قوس، شیب و فراز، تونل، مقاومت دیویس)، را ارائه کند. با توجه به اطلاعات موجود در شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران سعی شده است فرم‌های ورودی نرم‌افزار به نحوی باشد که امکان استفاده از اطلاعات موجود به سرعت مقدور باشد. هرچند تاکنون نرم‌افزارهایی به این منظور در ایران و سایر کشورها تهیه و ارائه شده است ولی در این نرم‌افزار سعی شده است مشکلات نرم‌افزارهای قبلی رفع شده و برای استفاده در راه‌آهن ایران مناسب باشد. زبان برنامه‌نویسی که در ساخت نرم‌افزار استفاده شده است سی‌شارپ (C#) زبانی شیءگرا و سطح بالا از خانواده زبانهای چارچوب دات‌نت شرکت مایکروسافت است. زبانC#، یک زبان برنامه‌نویسی چند الگویی است و توسط زمان اجرای زبان مشترک از .NET Framework پشتیبانی می‌شوند و در همه‌جا به‌وسیله مایکروسافت ویژوال استودیو شناخته می‌شود.

۳-۱ اطلاعات ورودی

نرم‌افزار تهیه شده اهداف متنوعی را شامل می‌شود که این تحقیق صرفاً به بخش حرکت یک قطار در مسیر و محاسبه خروجی‌های متنوع ناشی از حرکت آن می‌پردازد. اطلاعات موردنیاز در هفت دسته طبق جدول ۱ برای نرم‌افزار تعریف می‌شود.

اطلاعات شرایط هندسی محورها و ایستگاه‌ها به منظور معرفی مشخصات فنی مسیر به نرم‌افزار استفاده می‌شوند. اطلاعات شیب و فراز و قوس‌ها و پل‌ها در تعیین سرعت حرکت قطارهای عبوری کاربرد دارند. حین عبور قطار از قوس‌ها، میزان حداکثر سرعت عبوری طبق دو شیوه تعیین خواهد شد، اول اینکه سرعت قطار نمی‌تواند از میزان حداکثری که از طریق اداره کل خط و

ابنیه تعیین شده است تجاوز کند و دیگر اینکه سرعت قطار نباید از میزان محاسبه شده برای سرعت حداکثر عبوری که با توجه به شعاع قوس و دور خط محاسبه می‌شود، بیشتر باشد. به همین ترتیب حداکثر سرعت عبور از سوزن‌ها نیز با توجه به نوع و شعاع آنها برای نرم‌افزار تعیین می‌شود. در بخش اطلاعات غیرهندسی ایستگاه‌ها و محورها، اطلاعاتی مانند حداکثر سرعت عبوری از ایستگاه، درجه ایستگاه، داشتن توقف اجباری و نوع سوزن در تعیین سیاست عبور یا توقف قطار در ایستگاه و همچنین نحوه عبور قطار کاربرد دارند. با توجه به این اطلاعات، برنامه تصمیم خواهد گرفت که آیا قطار حین رسیدن به ایستگاه مجبور به توقف است؟ که در این صورت باید فاصله ترمز و محل ترمزگیری را به نحوی تعیین کند که قطار با سرعت ایمن در ایستگاه متوقف شود. در حالی‌که قطار نیاز به توقف کامل نداشته باشد و فقط محدودیت سرعت عبور از ایستگاه داشته باشد، برنامه، فاصله ترمزگیری و محل گرفتن ترمز را طوری تعیین می‌کند که هنگام عبور از ایستگاه با سرعت از پیش تعیین شده عبور کند. مشخصات فنی لکوموتیو و واگن‌ها به طور مستقیم در محاسبه مقاومت حرکت قطار با استفاده از روابط دیویس و همچنین تعیین نیروی کشش حرکت قطار کاربرد دارد. اطلاعات موردنیاز این بخش را می‌توان به دسته‌های نوع لکوموتیو یا واگن، مشخصات نیروی کشش، مشخصات ترمز، نوع رابطه دیویس مورد استفاده و همچنین سایر پارامترهای موردنیاز تقسیم‌بندی کرد. اطلاعات فنی قطارها مربوط به بخشی از اطلاعات است که برای ترکیب مشخصی از لکوموتیوها و واگن‌ها که تشکیل قطار می‌دهند قابل تعریف است. در نرم‌افزار اطلاعات مربوط به آلات ناقله در سه بخش لکوموتیو، واگن و قطار معرفی می‌شوند، به طوری که قطارها از

جدول ۱. اطلاعات ورودی نرم‌افزار شبیه‌سازی

رده اطلاعات	شامل
۱- شرایط هندسی محورهای ریلی	شامل موقعیت جغرافیایی، شیب و فراز، قوس‌ها، پل‌ها، تونل، سرعت عبور قطار از عوارض محورها
۲- شرایط هندسی ایستگاه‌ها	شامل موقعیت جغرافیایی، شیب ایستگاه، طول ایستگاه، ارتفاع ایستگاه از سطح دریا
۳- ویژگی‌های غیر هندسی بلاک‌ها	شامل تعداد خطوط هر بلاک، حداکثر سرعت عبور قطار از بلاک، سرعت باد، زمان مسدودی بلاک‌ها، زمان تعمیر و نگهداری بلاک‌ها
۴- ویژگی‌های غیرهندسی ایستگاه‌ها	شامل ترتیب ایستگاه‌ها، تعداد خطوط هر ایستگاه اعم از قبول و اعزام و سکوها و خطوط تأمین، حداکثر سرعت عبور قطار از ایستگاه، نمازخانه، زیرگذر، درجه ایستگاه، سیستم قبول و اعزام، وضعیت علائم خطوط، نوع و تعداد سوزن‌ها، وضعیت تقاطع، سامانه قبول و اعزام قطار، باز یا بسته بودن، جهت خطوط و سکوها، طول خطوط
۵- اطلاعات فنی و مشخصات لکوموتیوها	شامل قدرت لکوموتیو، حداکثر سرعت، وزن لکوموتیو، سطح مؤثر، حداکثر نیروی ترمز، تعداد محور، سرعت پیوسته، ضریب چسبندگی، طول، قدرت موتور به ازای دنده‌های مختلف، مصرف سوخت به ازای دنده‌های مختلف، معرفی رابطه دیویس یا سایر روابط مقاومت، رابطه مقاومت به ازای سرعت بالاتر از یک حد مشخص
۶- اطلاعات فنی واگن‌ها	شامل نام، وزن، طول، سطح مؤثر، تعداد محور، رابطه دیویس(به انتخاب کاربر)، نوع ترمز
۷- اطلاعات فنی قطارها	شامل شماره قطار، حداکثر سرعت قطار، تعداد آلات ناقله تشکیل دهنده هر قطار، (لازم به ذکر است برخی مشخصات قطارها مانند وزن یا طول با توجه به نوع لکوموتیوها و واگن‌ها و تعداد آنها توسط برنامه محاسبه می‌شود.)، دیزلی یا برقی، جهت حرکت قطار.

ترکیب از قبل مشخص تعدادی لکوموتیو و تعدادی واگن تشکیل خواهند شد. ترکیب برخی اطلاعات قطعات تشکیل دهنده قطار، بخشی از اطلاعات قطار را تولید می‌کند، به عنوان مثال وزن قطار از مجموع وزن لکوموتیوها و واگن‌ها تعیین می‌شود، ولی برخی دیگر از اطلاعات مربوط به قطارها، مانند حداکثر سرعت قطار و یا تعداد واگن‌ها، بستگی به سیاست‌های راه‌آهن دارد و مستقل از اجزای تشکیل دهنده آن است.

۳-۲ خروجی‌های نرم‌افزار

خروجی‌های نرم‌افزار این امکان را به وجود می‌آورد که تصمیم گیران ریلی بدون بکارگیری سیستم‌های جدید تأثیرات بکارگیری آنها را مشاهده کنند و فعالیت‌های چند سال حرکت قطارها و اتفاقات پیش آمده را در ظرف چند دقیقه و گاهی در ظرف چند ثانیه فشرده سازند. به کمک این امتیاز می‌توان طرح‌های متنوعی را با صرف زمان ناچیزی در مورد مسئله واقعی به اجرا گذارد و ارزیابی‌هایی از آنها به دست آورد. از طرفی این امکان را دارند مدل را به طور مکرر و تحت شرایط اولیه یکسان اجرا نمایند. از دیگر مزایا این است که می‌توان از نرم‌افزار در کمک به تحلیل هر سیستم پیشنهادی استفاده کرد، هرچند که داده‌های ورودی تقریبی و ناقص باشد زیرا معمولاً دست‌یابی به داده‌های شبیه‌سازی بسیار کم هزینه‌تر از فراهم آوردن داده‌های سیستم حقیقی است و بکار بردن روش‌های شبیه‌سازی معمولاً آسان‌تر و ملموس‌تر از روش‌های تحلیلی است[Profillidis, 2000 and Esveld, 2001] .

۳-۲-۱ نحوه تعیین زمان سیر بلاک، سرعت و شتاب لحظه‌ای

مقاومت‌های مسیر مانند مقاومت هوا، مقاومت شیب، مقاومت قوس، مقاومت ریل، مقاومت تونل و سایر مقاومت‌ها با رعایت روابط فیزیک محاسبه می‌شود که الگوریتم‌های محاسباتی لازم به صورت گام‌به‌گام به منظور محاسبه مقاومت و سایر خروجی‌های لازم مانند سرعت و شتاب برای نرم‌افزار معرفی شده‌اند که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

گام اول (محاسبه پروفیل بیشینه سرعت فیزیکی): در ابتدا با توجه به عوارض تعریف شده برای مسیر، پروفیل بیشینه سرعت فیزیکی مسیر توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. عوارض تعریف شده برای مسیر می‌تواند شامل قطعات با سرعت ثابت، محدودیت‌های سرعت در ایستگاه‌ها، محدودیت سرعت در قوس‌ها و غیره باشد. لازم به ذکر است که برای هر بلاک یک سرعت بیشینه عمومی که مختص بلاک است دریافت می‌شود که در تمامی نقاط آن بلاک برقرار است.

گام دوم (محاسبه پروفیل بیشینه سرعت عملیاتی): با توجه به آن که سرعت قطار نمی‌تواند در یک لحظه به میزان زیاد تغییر کند، بنابراین برای نقاطی که محدودیت سرعت یا الزام توقف در آنها وجود دارد، لازم است تا بیشینه سرعت قطار به شکل تدریجی کاهش یابد تا در نقطه مذکور، سرعت قطار به سرعت موردنظر برسد. تفاوت بیشینه سرعت فیزیکی و بیشینه سرعت عملیاتی دقیقاً در همین مورد قرار است. بر این اساس با استفاده از روابط مکانیکی، فاصله ترمز قطار برای رسیدن از یک سرعت به سرعت دیگر توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در فاصله مذکور بیشینه سرعت عملیاتی قطار به صورت خطی کاهش می‌یابد. نقطه موردنظر برای شروع کاهش سرعت را می‌توان به عنوان یک علامت هشدار مجازی در طول خط، برای دادن هشدار به راننده قطار جهت گرفتن ترمز در نظر گرفت. لازم به ذکر است جهت جلوگیری از تکرار، پروفیل سرعت عملیاتی از انتهای بلاک محاسبه شده و تا ابتدای بلاک ادامه می‌یابد.

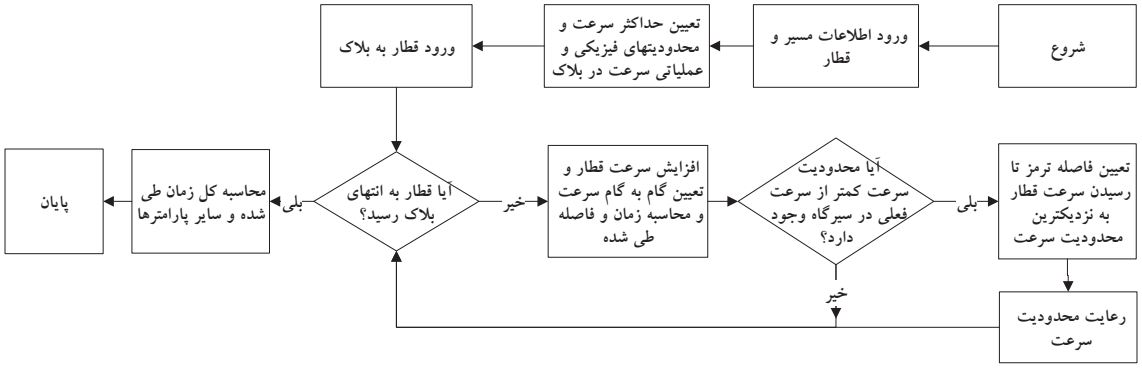
گام سوم (محاسبه سرعت و شتاب و مکان هندسی قطار): بر اساس روابط موجود جهت حرکت قطارها و مشخصات قطار، نیروی کشنده قطار در شروع حرکت محاسبه می‌شود. روند تعیین سرعت قطار به این شکل است که در ابتدا سرعت قطار ۱ واحد

(در اینجا یک کیلومتر بر ساعت که با توجه به دقت موردنیاز قابل تنظیم است) افزوده می‌شود و بر اساس این سرعت جدید مقاومت حرکت قطار از رابطه مقاومت دیویس محاسبه می‌شود، به علاوه سایر مقاومت‌ها از جمله مقاومت قوس، مقاومت شیب و مقاومت باد نیز به آن اضافه شده و در مجموع نیروی مقاوم در برابر حرکت قطار محاسبه می‌شود؛ سپس با تقسیم برآیند نیروی قطار بر وزن قطار، شتاب لحظه‌ای حرکت قطار محاسبه می‌شود: اگر این شتاب مثبت بود، افزایش ۱ واحد سرعت تائید شده و پس از محاسبه مکان هندسی پیموده شده قطار با این سرعت مجدداً روند افزایش سرعت تا رسیدن به بیشینه سرعت عملیاتی مجاز ادامه می‌یابد؛ اگر شتاب برابر صفر بود، افزایش سرعت تائید نشده و قطار با سرعت قبلی تا نقطه‌ای که یکی از شرایط مسیر تغییر کند (مثلاً مقاومت قوس یا شیب)، مسیر خود را ادامه می‌دهد؛ اگر شتاب منفی بود، افزایش سرعت قطار تائید نشده و در عوض سرعت قطار یک واحد کاهش می‌یابد، این کاهش تا زمان منفی بودن شتاب حرکت ادامه خواهد یافت.

اهمیت تعیین مناسب گام‌های متوالی سرعت در این مطلب نهفته است که در صورت انتخاب گام‌های بزرگ‌تر برای سرعت، به دلیل نادیده گرفته شدن تغییرات سرعت کوچک‌تر در طول مسیر دقت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد و ممکن است افزایش یا کاهش سرعت‌های کوچک در نظر گرفته نشوند. از طرف دیگر در صورتی که فاصله گام‌های سرعت خیلی کوچک در نظر گرفته شود حجم محاسبات به شکل قابل توجهی افزایش یافته و سرعت عملیات به طور محسوس کاهش می‌یابد. نحوه محاسبه مکان هندسی قطار به این نحو است که مسافت لازم برای افزایش یک واحد سرعت قطار با سرعت و شتاب موجود حرکت قطار با روابط مکانیک حرکت محاسبه می‌شود. بر اساس این داده‌ها نمودارهای سرعت لحظه‌ای، شتاب لحظه‌ای و مقاومت‌های قطار در هر نقطه از طول مسیر بلاک محاسبه و به صورت نمودار ترسیم می‌شود. همان‌طور که ذکر شد انتخاب مناسب گام سرعت از اهمیت بسیار زیادی در فرآیند شبیه‌سازی برخوردار است. از آن جا که مقادیر نیروی کشش، مقاومت‌ها و شتاب حرکت و سایر موارد منتج از آن وابسته به سرعت حرکت قطار هستند، بنابراین پردازشگر شبیه‌سازی نرم‌افزار مقادیر مربوطه را در گام‌های متوالی سرعت محاسبه می‌کند. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب دیاگرام مراحل محاسبه زمان سیر و همچنین روند تعیین علامت و میزان گام سرعت را نشان میدهند.

۳-۲-۲ نحوه محاسبه نیروی کشش و مقاومت‌ها

در ارتباط با نیروی کشش، مقداری از آن صرف غلبه بر مقاومت‌های داخلی لکوموتیو می‌شود و باقیمانده، تحت عنوان نیروی کشش قلاب، برای کشیدن واگن‌ها بکار می‌رود. برای آن که قطار بتواند به جلو حرکت کند باید نیروی کشش پیرامون چرخ به مسیر حرکت منتقل شود. این کار از طریق اصطکاک



شکل ۱. دیاگرام محاسبه زمان سیر

(چسبندگی) بین چرخ و ریل صورت می‌گیرد که در صورت کافی نبودن آن، چرخ به جای غلتیدن، درجا می‌زند. آن قسمت از نیروی کشش که از پیرامون چرخ محرک به مسیر حرکت منتقل می‌شود، نیروی کشش مؤثر (eff.TE) نام دارد و مقدار آن به وسیله میزان چسبندگی بین چرخ و ریل (ضریب اصطکاک یا چسبندگی f) و وزن اصطکاکی یا چسبندگی (W)، محدود می‌شود که در رابطه ۱ نشان داده شده است.

بنابراین شرایط چسبندگی موجود بین چرخ و ریل و توان کششی موتور لکوموتیو عواملی هستند که توسط نرم‌افزار محاسبه شده و حداکثر نیروی کشش قابل انتقال به مسیر را تعیین مینمایند[Profillidis, 2000 and Esveld, 2001].

$$eff.TE = f \times W \qquad (۱)$$

در مقابل نیروهای کشش نیروهای مقاوم قرار دارند که در جهت خلاف حرکت قطار عمل می‌کنند و مقدار آنها با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. این نیروها را می‌توان به صورت مقاومت داخلی لکوموتیو، مقاومت تونل، مقاومت شتاب گیری، مقاومت یاتاقان، مقاومت غلطشی، مقاومت هوا، مقاومت فراز و مقاومت قوس نشان داد که با استفاده از اطلاعات دریافتی لکوموتیو و واگن‌ها محاسبه می‌گردند. از آنجائی‌که مقاومت قطار عوامل گوناگونی نظیر سرعت، وزن و ترکیب قطار را در برمی‌گیرد، استفاده از یک مقدار کلی برای آن تنها برای محاسبات سرانگشتی کفایت می‌کند. به مرور زمان روش‌ها و مدل‌های نسبتاً دقیقی برای محاسبه مقاومت قطار پیشنهاد شده‌اند که انتخاب آنها به دقت موردنیاز، تجهیزات موجود و زمان لازم برای محاسبات بستگی دارد. بهترین رابطه در این خصوص روابط پیشنهاد شده دیویس و دیویس اصلاح شده است که در این نرم‌افزار کاربرد دارند.

در سال ۱۹۷۰ با توجه به پیشرفت‌های مطالعات و کاهش مقاومت کل، معادله دیویس به وسیله انجمن مهندسی راه‌آهن آمریکا AREA مورد تجدیدنظر قرار گرفت و به صورت رابطه ۲ درآمد، در عین حال که استفاده از معادله دیویس اولیه به دلیل همه منظور بودن آن همچنان ادامه پیدا کرد.

$$R_u = 0.6 + \frac{20}{w} + 0.01V + \frac{KV^2}{wn} \qquad (۲)$$

گام اول : سرعت قطار به میزان یک واحد افزایش داده می‌شود.

گام دوم : مقادیر نیروی کشش و کلیه مقاومت‌های حرکت، طبق سرعت جدید محاسبه می‌گردد.

گام سوم : برآیند نیروهای کشش و نیروهای مقاوم محاسبه می‌گردد

گام چهارم : نتایج ذخیره شده و گام‌های اول تا چهارم تکرار می‌گردند.

در صورتی که برآیند نیروی کشش و نیروهای مقاوم مثبت باشد افزایش سرعت به میزان یک گام تأیید می‌گردد؛ با استفاده از مقدار برآیند نیروها شتاب حرکت محاسبه شده و کیلومتر مکانی که در آن سرعت قطار به مقدار مورد نظر (سرعت پیشین به علاوه یک واحد گام سرعت) می‌رسد و مدت زمان حرکت محاسبه می‌گردد.

در صورتی که برآیند نیروی کشش و نیروهای مقاوم صفر باشد افزایش سرعت به میزان یک گام تأیید نمی‌گردد و سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ شتاب حرکت معادل صفر منظور شده و تا نقطه بعدی در طول مسیر که شرایط مسیر تغییر نماید حرکت با سرعت ثابت در نظر گرفته شده و مدت زمان حرکت تا آن نقطه محاسبه می‌گردد.

در صورتی که برآیند نیروی کشش و نیروهای مقاوم منفی باشد افزایش سرعت به میزان یک گام رد می‌گردد و در عوض سرعت به میزان یک گام کاهش داده می‌شود؛ با استفاده از مقدار برآیند نیروها شتاب حرکت محاسبه شده و کیلومتر مکانی که در آن سرعت قطار به مقدار مورد نظر (سرعت پیشین منهای یک واحد گام سرعت) می‌رسد و مدت زمان حرکت محاسبه می‌گردد.

شکل ۲. محاسبه علامت و میزان گام سرعت

که در آن R_u عبارت از مقاومت قطار، w بیانگر وزن هر محور، n نشان دهنده تعداد محورها، W برابر با وزن کل واگن‌ها، k ضریب مقامت هوا و V سرعت قطار است.

۳-۲-۳ محاسبه میزان مصرف انرژی

رابطه کلی استفاده شده برای محاسبه مصرف انرژی کششی، انتگرال نیروی کشش F روی مسافت s به صورت رابطه۳ بیان می‌شود:

$$E_{\text{mech}} = \int F(s)ds \qquad (۳)$$

فرمول بالا نشان می‌دهد که به طور اساسی، هر فرآیند شتاب گیری قطار (F نیروی کششی مثبت)، انرژی مصرف می‌کند، چه این فرآیند طبق برنامه باشد (مثل شتاب گیری بعد از یک توقف معین) و چه طبق برنامه نباشد(مثل شتابگری بعد از توقف در یک سیگنال)، از طرفی برای کوتاه‌تر کردن زمان حرکت تا مقصد، بیشتر قطارها باید شتاب بگیرند، در نتیجه انرژی بیشتری لازم دارند [Hansen, Pachl and Albrecht, Esveld, 2001] [2008].

برای محاسبه میزان مصرف سوخت در نرم‌افزار شبیه‌سازی، باید میزان مصرف انرژی برای قطار را بر اساس انرژی موردنیاز برای غلبه بر مقاومت‌ها محاسبه کرد. مقاومت برای شیب، شعاع قوس، گرانش، اصطکاک هوا، اصطکاک ریل و سرعت محاسبه می‌شود. تعداد ضرایب بکار گرفته شده برای مرتبط کردن این پارامترها با مصرف انرژی، به نوع قطار و انواع خطوط بستگی دارد.

به عبارت دیگر با استفاده از محاسبه سطح زیر منحنی دیاگرام نیروی کشش- مسافت که در حال حاضر نرم‌افزار ارائه شده جهت ترسیم پروفیل سرعت قادر است این دیاگرام را رسم کند، می‌توان میزان کار انجام شده بر حسب ژول را محاسبه کرد. از طرفی با استفاده از میزان انرژی تولید شده توسط گازوییل مصرفی، می‌توان میزان سوخت موردنیاز جهت حرکت قطارها را محاسبه کرد.

۴. مطالعه موردی برای مسیر تهران مشهد

این بخش به ارائه یک مثال عملی و کاربردی نرم‌افزار برای مسیر تهران مشهد پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است مسیر تهران مشهد دارای ۴۹ ایستگاه و به طول تقریبی ۹۲۶ کیلومتر است و مهم‌ترین مسیر ریلی کشور برای عبور مسافران است. در مطالعه موردی، قطار عادی طبق مشخصات برنامه تابستان ۹۱، با یک لکوموتیو GT26 و ۱۳ واگن مدنظر است.

شکل ۳. مسیر دو خطه تهران- مشهد

۴-۱ ورود اطلاعات

۴-۱-۱ معرفی زیرساخت مسیر

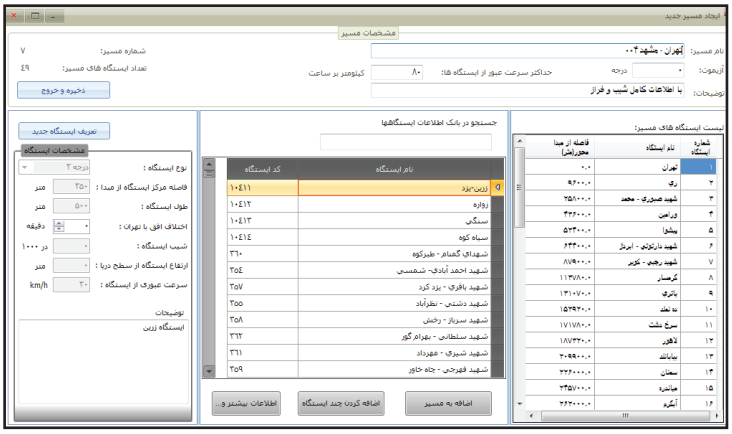
زیرساخت ریلی مسیر شامل ۴۹ ایستگاه و موقعیت آنها، در فرم ایجاد محور جدید مطابق شکل ۴، به نرم‌افزار معرفی شد.

حداکثر سرعت عبور آزاد قطارها از ایستگاه‌های محور ریلی تهران – مشهد معادل ۸۰ کیلومتر بر ساعت تعیین شده که برای هر ایستگاه به طور جداگانه نیز قابل تعیین است و فهرست ایستگاه‌های این محور و کیلومتر قرارگیری آنها مطابق موقعیت واقعی آنها وارد شد. به عنوان نمونه ایستگاه تهران (ایستگاه مبدأ مسیر) در کیلومتر ۰+۰۰۰ مسیر، ایستگاه سمنان در کیلومتر ۲۲۶+۰۰۰ و ایستگاه مشهد (ایستگاه مقصد مسیر) در کیلومتر ۹۲۵+۱۶۰ تعریف شده است.

۴-۱-۲ مشخصات ایستگاه‌های مسیر

مشخصات ایستگاه‌های محور تهران مشهد شامل ارتفاع، حداکثر سرعت عبور، مشخصات خطوط، طول ایستگاه بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت راه‌آهن وارد نرم‌افزار شد. به عنوان یک نمونه مشخصات ایستگاه تهران در شکل ۵ نمایش داده شده است.به عنوان مثال اهم اطلاعات ایستگاه تهران که جمعاً دارای ۱۵ خط ایستگاهی شامل ۴ سکو و ۱۱ خط قبول و اعزام است، به شرح زیر تعریف شده است:

- نوع ایستگاه : تشکیلاتی – گار
- شیب ایستگاه : ۱۵ در هزار
- حداکثر سرعت عبور از ایستگاه : ۳۰ (km/hr)
- سیستم قبول اعزام : جواز راه آزاد و علائم الکتریکی



شکل ۴. صفحه ایجاد محور تهران – مشهد

شکل ۵. صفحه مشخصات ایستگاه تهران

- تعداد سوزن دستی : ۲۲۸ عدد
- جغرافیای منطقه : جلگه‌ای
- طول ایستگاه : ۵۰۰ متر
- ارتفاع از سطح دریا : ۱۱۱۷ متر
- خطوط مجهز به علائم : ۷ خط
- تعداد خطوط قبول/اعزام : ۱۵ خط
- تعداد سوزن برقی : ۵۶ عدد
- نوع ریل : U33

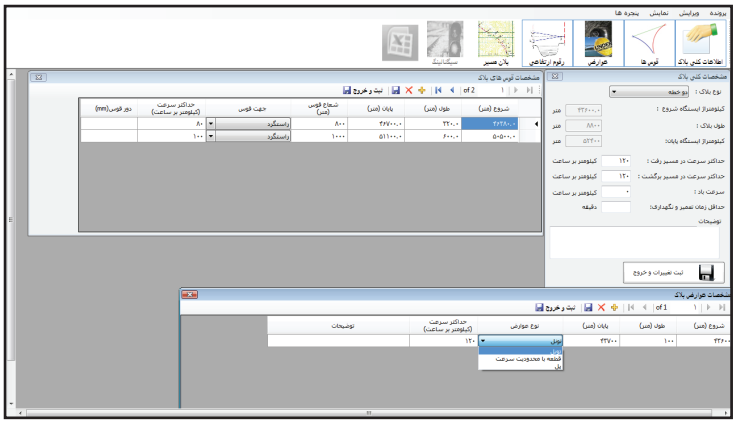
۴-۱-۳ مشخصات هندسی مسیر

مشخصات پروفیل طولی و قوس‌های محور ریلی تهران – مشهد بر اساس اطلاعات دریافتی از اداره زیرساخت شرکت راه‌آهن از طریق فایل‌های ورودی به بانک اطلاعاتی نرم‌افزار وارد شد. فایل‌های ورودی اطلاعات پروفیل طولی و قوس‌های مسیر در قالب مایکروسافت اکسل هستند (یا از طریق فرم‌ها می‌توان این اطلاعات را وارد کرد). بخشی از اطلاعات ورودی پروفیل طولی محور تهران – مشهد در جدول ۲ و بخشی از اطلاعات ورودی قوس‌های این محور در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲. بخشی از اطلاعات ورودی پروفیل طولی

محور تهران – مشهد

کیلومتراژ شروع (متر)	کیلومتراژ پایان (متر)	طول (متر)	شیب در هزار
۰	۲۵۰	۲۵۰	۰
۲۵۰	۱۵۰۰	۱۲۵۰	۵-
۱۵۰۰	۲۶۰۰	۱۱۰۰	۵-
۲۶۰۰	۳۸۰۰	۱۲۰۰	۴-



شکل ۶. صفحه مشخصات بلاک‌های مسیر شامل عوارض و قوس‌های مسیر

شکل ۷. رقوم ارتفاعی یک بلاک نمونه

جدول ۳. بخشی از اطلاعات ورودی قوس‌های

محور تهران – مشهد

کیلومتراژ شروع (متر)	کیلومتراژ پایان (متر)	طول (متر)	شعاع (متر)	راستگرد=۱ چپگرد=۲	سرعت حداکثر
۱۲۴۹	۲۰۴۷	۷۹۸	۵۰۰۰	۱	۱۰۰
۲۵۶۵	۳۸۰۰	۱۲۳۵	۱۰۰۰	۲	۱۰۰
۱۰۶۸۰	۱۱۴۰۰	۷۲۰	۱۰۰۰	۱	۱۰۰

۴-۱-۴ مشخصات بلاک‌های مسیر

مشخصات بلاک‌های محور تهران – مشهد از قبیل یک خطه یا دو خطه بودن بلاک‌ها، حداکثر سرعت مجاز در مسیرهای رفت و برگشت بلاک‌ها، سرعت باد غالب در بلاک، حداقل زمان تعمیر و نگهداری در بلاک، دِور قوس‌ها، عوارض غیر ارتفاعی و ابنیه فنی و قطعات دارای محدودیت سرعت، از طریق صفحات ویرایش بلاک‌های مسیر همانند شکل ۶ و ۷ برای بلاک‌های محور تهران – مشهد تعریف شدند. لازم به ذکر است که کلیه بلاک‌های محور تهران – مشهد از نوع دو خطه هستند.

۴-۱-۵ مشخصات لکوموتیوها

برای این مثال موردی از لوکوموتیو نوع GT26 برای تعریف یک قطار مسافری نمونه برای مسیر استفاده شده است. برای ورود مشخصات لوکوموتیو GT26 از صفحه مشخصات لکوموتیوها مشابه شکل ۸ استفاده شده است. اهم مشخصات لوکوموتیو GT26 به شرح زیر تعریف شده است:

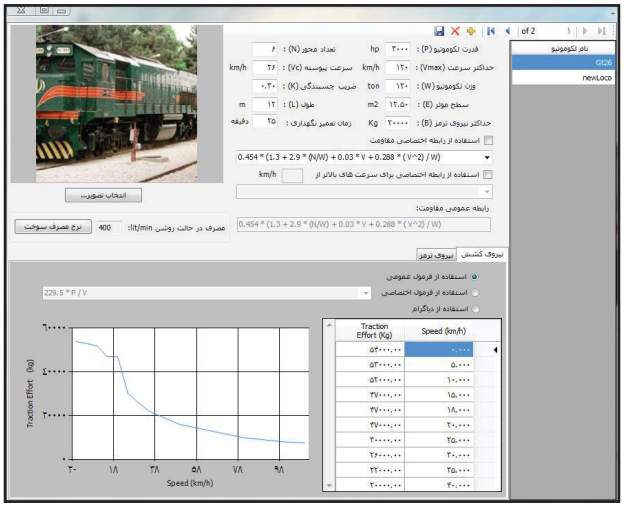
- قدرت لوکوموتیو : ۳۰۰۰ اسب بخار
- حداکثر سرعت : ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت
- وزن لوکوموتیو : ۱۲۰ تن
- سطح مؤثر : ۱۲,۵ مترمربع
- حداکثر نیروی ترمز : ۲۰۰۰۰ کیلوگرم
- تعداد محور : ۶ عدد
- سرعت پیوسته : ۲۶ کیلومتر بر ساعت
- ضریب چسبندگی : ۰,۳۰
- طول : ۱۲ متر
- زمان تعمیر و نگهداری : ۲۵ دقیقه

لازم به ذکر است روابط محاسباتی مقاومت لوکوموتیو و واگن‌ها بر اساس رابطه دیویس که مورد تائید راه‌آهن جمهوری اسلامی است که به صورت رابطه ۴ تعریف شده است.

(۴)

$$0.454*(1.3+2.9*(N/W)+0.03*V+0.288*(V^2)/W)$$

که در آن N: تعداد محور، W: وزن لکوموتیو و V: سرعت قطار است.



شکل ۸ صفحه مشخصات لوکوموتیو GT26

۴-۱-۶ مشخصات واگن‌ها

برای این پروژه شبیه‌سازی از واگن تیپ مسافری برای تعریف قطارهای مسافری مسیر استفاده شده است. برای ورود مشخصات واگن تیپ مسافری از صفحه مشخصات واگن‌ها استفاده شده است. اهم مشخصات واگن تیپ مسافری به شرح زیر تعریف شده است:

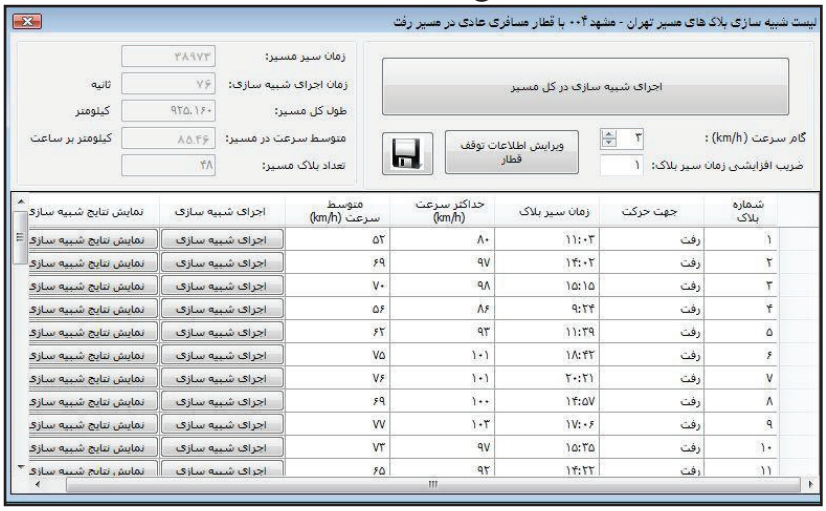
- وزن واگن : ۵۰ تن
- طول : ۲۵ متر
- سطح مؤثر : ۱۰ مترمربع
- تعداد محور : ۴ عدد

روابط محاسباتی این واگن نیز بر اساس رابطه دیویس که مورد تائید راه‌آهن جمهوری اسلامی است تعریف شده است.

پس از تعریف لوکوموتیو و واگن موردنظر، قطار مسافری عادی شامل یک لکوموتیو GT26 و ۱۳ واگن تیپ مسافری تعریف شده است. نرم‌افزار پس از دریافت مشخصات آلات ناقله، مشخصات جدیدی برای قطار تولید خواهد کرد.

۴-۲ خروجی‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار

مطالعه موردی برای مشخصات قطار عادی تهران مشهد است که طبق برنامه در تابستان ۹۱ همه روزه از ساعت ۱۰ از تهران شروع به حرکت کرده و می‌بایست ساعت ۲۳ و ۲۵ دقیقه به شهر مشهد برسد. به عبارت دیگر قطار مذکور با یک لکوموتیو GT26 و ۱۳ واگن مسافری ۵۴ نفره، مسافت ۹۲۶ کیلومتری تهران مشهد را سیزده ساعت و بیست و پنج دقیقه طی کند که از این مدت یازده ساعت و چهل دقیقه زمان سفر و مابقی زمان توقف‌های برنامه‌ای بوده است. به این دلیل که این قطار بیشترین زمان سفر بین مبدأ و مقصد را به خود اختصاص داده است و همه روزه بوده و از طرفی در اکثر ایستگاه‌ها توقف دارد به عنوان قطار مناسب جهت مطالعه موردی انتخاب شده است. شبیه‌سازی حاضر در حالت قطعی صورت گرفته است، به این معنی که زمان سیر بلاک‌ها ثابت بوده و هیچ نوع خرابی برای قطار در طی مسیر اتفاق نمی‌افتد. گام سرعت شبیه‌سازی معادل ۱ کیلومتر بر ساعت فرض شده است. نتایج شبیه‌سازی حرکت این قطار در مسیر رفت محور ریلی تهران – مشهد در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، زمان سیر کل این قطار در جهت رفت این شبیه‌سازی معادل ۳۸,۹۷۳ ثانیه برآورد شده است که معادل ۰۱ ساعت و ۹۴ دقیقه و ۳۳ ثانیه است. بر این اساس متوسط سرعت سیر قطار در این مسیر معادل ۸۵,۴۶ کیلومتر بر ساعت بوده است. شبیه‌سازی حاضر در مدت زمان ۷۶ ثانیه انجام گرفته است. شکل ۱۰ نمودار سرعت لحظه‌ای حرکت این قطار را در یکی



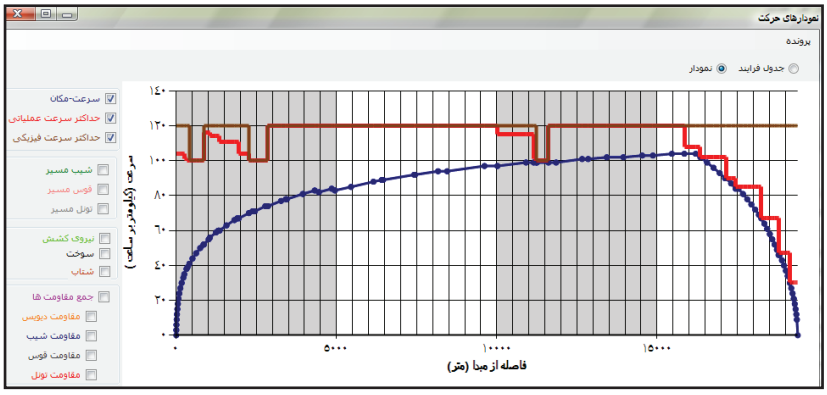
شکل ۹. صفحه نتایج شبیه‌سازی حرکت یک قطار در جهت رفت در مسیر تهران – مشهد

از بلاک‌های مسیر رفت را نشان می‌دهد. سرعت فیزیکی که در شکل با رنگ قهوه‌ای دیده می‌شود، بیانگر حداکثر سرعتی است که با توجه به دینامیک مسیر و مشخصات هندسی توسط شرکت راه‌آهن تعیین شده و در این بلاک برابر با ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بوده و باید رعایت شود، از طرفی سرعت مجاز عبور از قوس‌ها و یا عوارض نیز باید تحت عنوان سرعت فیزیکی توسط قطارها رعایت شود. سرعت عملیاتی که با رنگ قرمز است، سرعتی است که توسط برنامه تعیین می‌شود و کاربرد آن محدود کردن بیشینه سرعتی است که قطار می‌تواند با توجه به نیروی کشش و مقاومت‌ها به دست آورد. می‌توان مشاهده کرد که سرعت لحظه‌ای قطار در طول این بلاک کمتر از محدودیت‌های حداکثر سرعت فیزیکی و عملیاتی است، زیرا مقاومت‌ها و شیب و فراز مسیر نمی‌گذارند قطار به حداکثر سرعت مجاز خود دست یابد.

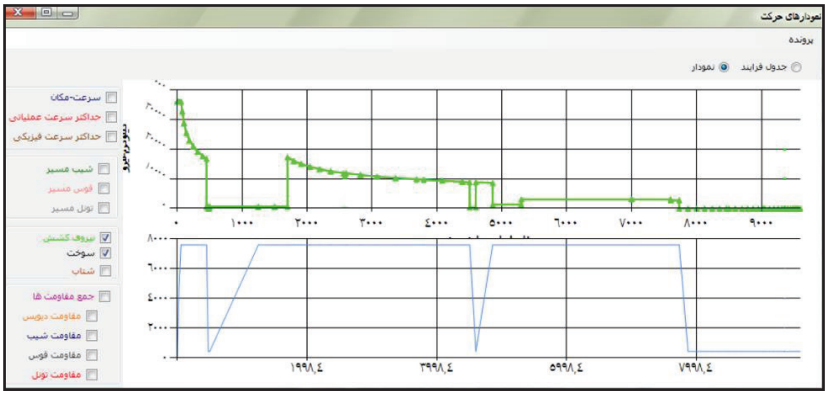
در انتهای بلاک، هرچند قطار حین افزایش سرعت است ولی با توجه به فاصله ترمز گیری که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود، مجبور به ترمز می‌شود تا در محل ایستگاه متوقف شود.

شکل ۱۱ نمودارهای نیروی کشش و مصرف سوخت قطار در جهت رفت در بلاک شماره ۱ مسیر را نشان می‌دهد. بیشترین نیروی کشش حین حرکت قطار رخ می‌دهد و کمترین میزان آن برابر با صفر است که حین ترمز و یا زمانی‌که قطار در سراشیبی است، رخ می‌دهد. میزان مصرف سوخت برای کل مسیر برای قطار مدنظر برابر با ۳۹۹۴ لیتر محاسبه شده است. در شکل ۱۲ مقاومت دیویس با رنگ نارنجی، مقاومت شیب با رنگ آبی، مقاومت قوس با رنگ مشکی و مجموع آنها با رنگ بنفش برای قطار مدنظر برای جهت رفت بلاک نشان داده شده است.

می‌توان مشاهده کرد که نیروی مقاوم ناشی از شیب که در این



شکل ۱۰. نمودارهای سرعت قطار در یکی از بلاک‌های مسیر تهران – مشهد

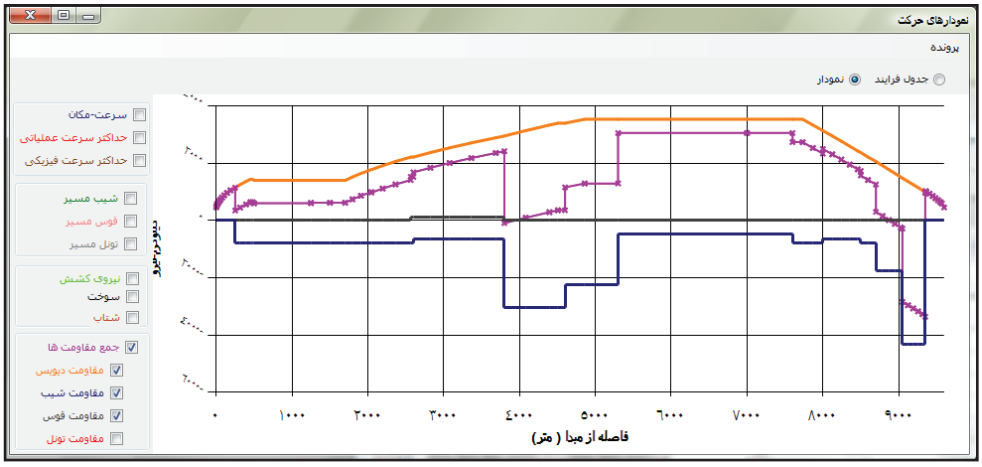


شکل ۱۱. نمودارهای نیروی کشش و مصرف سوخت قطار در بلاک شماره ۱ در جهت رفت مسیر تهران – مشهد

بلاک بر قطار وارد می‌شود دارای علامت منفی است. به عبارت دیگر قطار در سراشیبی قرار داشته و بنابراین به نیروی کمتری جهت غلبه بر نیروهای مقاوم درونی قطار که عبارت از مقاومت دیویس (نمودار قرمز رنگ) است نیاز دارد. بر این اساس می‌توان مشاهده کرد که تقریباً در بخش اعظم طول این بلاک برآیند نیروهای ورودی بر قطار (نمودار بنفش رنگ) کمتر از مقاومت داخلی قطار است.

۵. بازرسی و اعتبارسنجی

منظور از بازرسی مدل، حصول اطمینان از این مطلب است که فرضیات و قوانین حاکم بر پدیده‌ها با دقت کافی در مدل کاربردی انعکاس یافته است. در واقع مدل به منزله وسیله‌ای برای تبدیل ورودی به خروجی است و اعتبار چنین تبدیلی بایستی تعیین شود. به منظور مقایسه مدل با واقعیت از آزمون‌هایی که برخی براساس نظرات کارشناسی و برخی با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات واقعی در شرایط مشابه است، استفاده شد. در آزمون‌های با استفاده از نظرات کارشناسی، نتایج این آزمونها حاکی از عملکرد خوب مدل بود. در آزمون‌های مبتنی بر مقایسه نتایج شبیه‌سازی و واقعیات نیز نتایج آزمون فرضیه مؤید عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین نتایج مدل شبیه‌سازی و واقعیت مشاهده شده بود. از مهم‌ترین خروجی‌های برنامه، محاسبه زمان سیر قطار مدنظر در مسیر با استفاده از مدل است که به همراه میانگین زمان سیر مشاهده شده همان قطار در مسیر، در جدول ۴ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. میانگین زمان سیر مشاهده شده قطار مذکور برای تابستان ۹۱ بدون لحاظ زمان توقف در ایستگاه‌ها برابر با ۷۰۰ دقیقه بوده است که این میزان توسط نرم‌افزار حدود ۶۵۰ دقیقه محاسبه شده است که اختلافی حدود ۷ درصد با زمان مشاهده شده، نشان می‌دهد. علت این اختلاف به سه دلیل است: اول، مبنای محاسبه زمان سیر مشاهده شده بر اساس متوسط واقعی زمان سیر قطارها در مسیر است و در محاسبه آنها از روابط ریاضی که در نرم‌افزار کاربرد دارد استفاده نشده است. دوم، اینکه در زمان سیر مشاهده شده اندکی افزایش زمان به دلیل خطای لکوموتیوران ناشی از عدم اتخاذ به موقع تصمیم در ترمزگیری و یا شتابگیری وجود دارد که در نرم‌افزار این خطا در نظر گرفته نشده است و سوم اینکه در محاسبات نرم‌افزار، قطار با توان و کارآیی کامل از عوارض مسیر شامل شیب و فرازها و قوس‌ها عبور می‌کند که در واقع این‌گونه نیست و اندکی از کارآیی قطارها به دلیل استهلاک کاسته شده است. البته به منظور جبران این اختلاف می‌توان از ضرایب اصلاحی در نرم‌افزار استفاده کرد تا شرایط واقعی حرکت قطارها به طور دقیق‌تر در



شکل ۱۲. نمودار مقاومت‌های قطار در بلاک شماره ۱ در جهت رفت مسیر تهران – مشهد

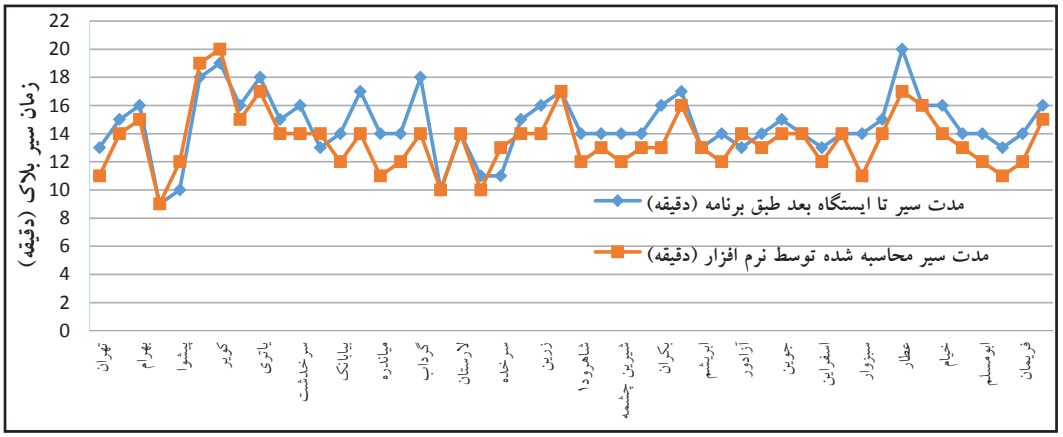
نظر گرفته شود. میزان سوخت مصرفی قطار نمونه برابر با ۳۹۹۴ لیتر برآورد شده است که امکان مقایسه آن با میزان واقعی مصرف سوخت به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی مقدور نبود، ولی در این خصوص نیز عدد محاسبه شده مورد تائید شرکت راه‌آهن قرار گرفته است و به نظر می‌رسد نرم‌افزار توانسته است با دقت خوبی این مقدار را برآورد کند.

۶. نتیجه‌گیری

در حال حاضر در راه‌آهن ایران روشی نظام‌مند جهت محاسبه پارامترهای حرکت قطارها در بلاکها وجود ندارد و پارامترهایی مانند زمان سیر یا میزان مصرف سوخت با استفاده از اندازه‌گیری تجربی یا درون‌یابی خطی محاسبه می‌شود که صحیح نیست و این محاسبات باید بر مبنای چگونگی مشخصات فنی مسیر و قطار با استفاده از روابط مناسب محاسبه شود. این تحقیق با هدف ارائه ابزاری بر مبنای شبیه‌سازی بر اساس مدل پویا و واقعه پایه است که بتواند بدون سعی و خطا سیستم را مدل کرده و خروجی‌های مدنظر تصمیم گیران را محاسبه کند. هرچند تاکنون نرم‌افزارهایی به این منظور در سایر کشورها تهیه و ارائه شده است، ولی در این تحقیق سعی شده است مشکلات نرم‌افزارهای قبلی رفع شده و با توجه به نوع داده‌های موجود، برای استفاده در راه‌آهن ایران مناسب باشد. ابزار ارائه شده قادر خواهد بود اطلاعات ورودی مشخصات هندسی مسیر شامل بلاک‌ها و ایستگاه‌ها، مشخصات فنی لکوموتیو و واگن‌ها، مشخصات فنی قطارها، روابط نیروی کشش و مقاومت‌ها و همچنین علائم مسیر را برای قطارهای باری و مسافری دریافت و خروجی‌هایی مانند زمان سیر قطار در بلاک و کل مسیر، میزان مصرف سوخت، سرعت لحظه‌ای و

جدول ۴. زمان سیر مشاهده شده قطار نمونه در شش بلاک اولیه مسیر تهران مشهد در مقایسه با اطلاعات استخراج شده از نرم‌افزار

اطلاعات ایستگاه‌ها			اطلاعات زمان سیر مشاهده شده	اطلاعات محاسبه شده توسط نرم‌افزار	
کیلومتر	نام ایستگاه	فاصله تا ایستگاه بعد (km)	مدت سیر تا ایستگاه بعد (min)	مدت سیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار (min)	اختلاف نسبت به زمان مشاهده شده (min)
۰	تهران	۱۰	۱۳	۱۱	-۲
۱۰	ری	۱۶	۱۵	۱۴	-۱
۲۶	بهرام	۱۸	۱۶	۱۵	-۱
۴۴	ورامین	۹	۹	۹	۰
۵۳	پیشوا	۱۲	۱۰	۱۲	۲
۶۵	ابردژ	۲۳	۱۸	۱۹	۱



شکل ۱۳. مقایسه زمان سیر برنامه‌ای و زمان سیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار

متوسط قطار، نیروی کشش لحظه‌ای قطار و دیاگرام مقاومت‌های پیش روی حرکت قطار (شامل مقاومت قوس، شیب و فراز، تونل، مقاومت دیویس)، ارائه کند. پس از ارائه گام‌به‌گام نحوه کارکرد مدل، یک مثال موردی برای حرکت یک قطار عادی در مسیر تهران-مشهد با یک لکوموتیو GT26 و ۱۳ واگن مسافری ۵۴ نفره انجام شد که به منظور انجام مقایسه منطقی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای، سعی شد کلیه جزییات و داده‌های موجود برای مشخصات فنی قطار شامل مشخصات لکوموتیوها و واگن‌ها و همچنین کلیه اطلاعات هندسی و غیرهندسی مسیر اخذ و برای مدل شبیه‌ساز تعریف شود. زمان اجرای برنامه برای کلیه بلاک‌های مسیر به طول ۹۲۶ کیلومتر حدود یک دقیقه بود. مجموع زمان سیر قطار در مسیر حدود سیزده ساعت محاسبه شد که حدود دو ساعت آن مربوط به توقف‌های برنامه‌ای قطار و مابقی مربوط به زمان در حال حرکت قطار است. در مرحله نهایی نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز با میانگین داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در آزمون‌های با استفاده از نظرات کارشناسی، نتایج این آزمون‌ها حاکی از عملکرد خوب مدل بود. در آزمون‌های مبتنی بر مقایسه نتایج شبیه‌سازی و واقعیات نیز نتایج آزمون فرضیه مؤید عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین نتایج مدل شبیه‌سازی و واقعیت مشاهده شده بود. بین خروجی‌های نرم‌افزار و داده‌های مشاهده‌ای، اختلاف ۷ درصدی مشاهده شد که مهم ترین دلیل آن خطای ناشی از عدم اتخاذ تصمیمات بموقع توسط لکوموتیوران حین ترمزگیری و یا شتابگیری است. در خصوص محاسبه میزان مصرف سوخت نیز با دقت خوبی مقدار سوخت مصرفی برآورد شد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1- Dynamic Model

2- Event-base Model

۸ مراجع

-Abril, M., Barber, F., Ingolotti, M. A., Tormos, P. and Lova, A. (2008) "An assessment of railway capacity", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 44, pp. 774-806.

-Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A. and Vimercati, S. (1998) "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line ", Power Delivery, IEEE Transactions, Vol. 13, pp. 1536-42.

-Büker, T. and Seybold, B. (2012) "Stochastic modelling of delay propagation in large networks", Journal of Rail Transport Planning and Management, Vol. 2, pp. 34-50.

-Chevrier, R., Pellegrini, P. and Rodriguez, J. "Energy saving in railway timetabling: a bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.37, pp. 20-41.

-Esveld, C. (2001) "Modern railway track", Netherlands: Delft University of Technology.

-Hansen, H., Pachl, J. and Albrecht, T. (2008) "Railway timetable and traffic: analysis, modelling, simulation, modelling, simulation", Eurailpress.

-Kelton, D. and Sadowski, R. (2002) "Simulation with arena", McGraw-Hill New York, Vol. 3.

-Li, K. and Gao, Z. (2007) "Improved equation model for the train movement', simulation modelling practice and theory", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol.15, pp. 1156-62.

-Liu, R.R. and Golovitcher, I. (2003) "Energy-efficient operation of rail vehicles ", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 37, pp. 917-32.

-Marinov, M. and Viegas, J. (2011) "A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol.19, pp. 516-39.

-Profillidis, V.A. (2000) "Railway engineering", USA: Burlington.

-Salido, M.A., Barber, F. and Ingolotti, L. (2012) "Robustness for a single railway line: analytical and simulation methods ", Expert Systems with Applications, Vol. 39, pp. 13305-27

-Schlechte, T., Borndörfer, R., Erol, B., Graffagnino, T. and Swarat, E. (2011) "Micro–macro transformation of railway networks ", Journal of Rail Transport Planning and Management, Vol. 1, pp. 38-48.

-Van Loon, R., Rietveld, P. and Brons, B. (2011) "Travel-time reliability impacts on railway passenger demand: a revealed preference analysis", Journal of Transport Geography, Vol. 19, pp. 917-25.

-Vromans, M., Dekker, R. and Kroon, G. (2006) "Reliability and heterogeneity of railway services ", European Journal of Operational Research, Vol. 172, pp. 647-65.

-Yaghini, M. and Mohammadzade, A. (2011) "A model for scheduling trains with considering stop time for praying", Journal of Industrial Engineering, Vol. 45, pp. 103-16.

-Yalçınkaya, Ö. and Bayhan, M. (2012) "A feasible timetable generator simulation modelling framework for train scheduling problem ", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 20, pp. 124-41.

-Yang, L., Li, K., Gao, Z. and Li, X. (2012) "Optimizing trains movement on a railway network", Omega, Vol. 40, pp. 619-33.