

مدل‌سازی و تنظیم بلادرنگ ترافیک خطوط مترو با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی

سیما نجفی^۱، بیژن معاونی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کنترل و علائم، گروه راه‌آهن برقی، دانشگاه علم و صنعت ایران، sima_najafi_ee@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، b_moaveni@iust.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، بازیابی تأخیر زمانی و تنظیم بلادرنگ جریان ترافیک در خطوط مترو با استفاده از کنترل‌کننده‌های اتوماتیک به‌منظور بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های فرکانس بالای مترو، به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله، به ارائه مدل دینامیکی جدیدی از سیستم ترافیکی مترو در یک مسیر رفت و برگشتی می‌پردازد. مدل ارائه‌شده، یک نمایش گسسته پیشامد غیرخطی است که بر اساس انحراف از زمان اعزام قطارها در یک مسیر رفت و برگشتی بیان گردیده و برخلاف مدل‌های پیشین پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر نیز باهدف نمایش واقعی از نحوه عملکرد حرکت قطارها در آن لحاظ گشته است. همچنین در این مقاله، با هدف بازیابی تأخیر و دفع اثر اغتشاشات از کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی استفاده شده و ورودی کنترلی در جهت کاهش تأخیر زمانی در هر مرحله تولید و به زمان سفر قطارها در فاصله بین ایستگاه‌ها اعمال می‌شود. در فرایند طراحی این کنترل‌کننده، تابع هزینه‌ای بر مبنای کاهش تأخیر زمان اعزام قطارها و همچنین افزایش رضایت مسافران مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با هدف ایجاد امکان پیاده‌سازی واقعی، نقش قیود و محدودیت‌های واقعی بر روی سیگنال کنترلی و سرفاصله زمانی اعزام قطارها در فرایند طراحی کنترل‌کننده لحاظ شده است. درنهایت نتایج شبیه‌سازی به‌منظور نمایش صحت عملکرد مدل پیشنهادی و همچنین عملکرد موفق سیستم کنترل پیش‌بین غیرخطی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی دینامیک ترافیک ریلی، بازیابی تأخیر زمانی، کنترل پیش‌بین غیرخطی، قیود عملکردی

Modeling and Real-time Traffic Regulation in Metro Loop Lines using Nonlinear Model Predictive Control

Sima Najafi, Bijan Moaveni

Abstract: Automatic traffic regulation plays an important role in public transportation especially in metro lines. Delay recovery and real-time control strategies are employed to obtain optimal schedule of high frequency lines in recent years. This paper presents a new traffic model for metro loop lines based on the time deviations of departure times. In this model, a phenomena of transferring knock on delay from one train to another one has been considered. The objective function is considered to minimize the time deviation and increase the passenger satisfaction with headway adherence. Nonlinear model predictive controller is employed to compensate the disturbances and recover the nominal time schedule in metro traffic system by varying the running time between two successive platforms. We minimize the objective function by designing nonlinear model predictive controller in the presence of the operational constraints on control actions and time interval between two successive trains. Simulation results verify the introduced model and show the performance of nonlinear model predictive controller to minimize the delays.

Keywords: Metro Traffic Modelling, Delay Recovery, Nonlinear Model Predictive Control, Operational Constraints.

۱- مقدمه

امروزه افزایش چشمگیر جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی موجب توجه ویژه به مسئله حمل‌ونقل و به‌ویژه کیفیت سرویس‌دهی آن در کلان‌شهرها شده است. شبکه مترو یکی از کارآمدترین ابزارهای حمل‌ونقل عمومی است که با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری صحیح و سرویس‌دهی به‌موقع می‌توان به جذابیت آن افزود و استفاده‌کنندگان از آن را به استفاده هر چه بیشتر از آن ترغیب نمود. این امر در حالی است که خطوط مترو همواره در معرض اغتشاشات ناخواسته از جمله مشکلات فنی، تغییر ناگهانی حجم مسافری، متقاضی سفر به علل مختلف و همچنین رخدادهای مقطعی و ... قرار می‌گیرند که عملکرد حرکت سیستم ترافیکی را از جدول زمان‌بندی اولیه دور می‌نماید.

خطوط مترو سیستم‌های حمل‌ونقل، خطوط فرکانس بالایی محسوب می‌گردند که از ویژگی‌های آن‌ها، ناپایداری این خطوط است. ناپایداری در خطوط مترو در واقع عبارت است از اینکه، با بروز اغتشاش و به وجود آمدن تأخیر در یکی از قطارها، مقدار این تأخیر در طول مسیر برای خود قطار و همچنین قطارهای بعدی رشد نموده و منجر به ناپایداری کل سیستم ترافیکی خواهد شد [۱] و [۲]. از این رو کنترل بلادرنگ^۱ ترافیک و کنترل حرکت قطارها طبق جدول زمان‌بندی از جمله مواردی است که در سال‌های اخیر در جهت افزایش کارایی و ارتقا بهره‌برداری از شبکه مترو مورد توجه مهندسين و محققين حوزه سیستم‌های هوشمند ترافیک ریلی قرار گرفته است [۳].

مدیریت خطوط ریلی در چهار سطح انجام می‌شود: استراتژیک، تاکتیکی، کنترل عملیاتی و کنترل بلادرنگ. مدیریت استراتژیکی مربوط به تصمیم‌گیری‌های درازمدت است. درحالی‌که عملیات تاکتیکی برنامه‌ریزی سالانه، ماهانه و هفتگی است و تصمیمات آن بر اساس برنامه‌ریزی خط، طراحی جدول زمان‌بندی و مسیرسازی می‌باشد. کنترل عملیاتی در بازه‌های زمانی کمتر از مدیریت تاکتیکی می‌باشد و بیشتر در زمان بهره‌برداری از آن استفاده می‌شود. کنترل بلادرنگ نیز در زمانی که رخدادهای غیرمنتظره در سیستم ترافیکی موجب رخ دادن تأخیر می‌گردد مورد استفاده قرار گرفته و در جهت کاهش تأخیر عمل می‌نماید. لذا بازبایی جدول نامی زمان اعزام قطارها در زمان رخ دادن تأخیر زمانی که به اصطلاح بازبایی تأخیر^۲ زمانی نامیده می‌شود از اهداف این سطح از مدیریت ترافیک ریلی می‌باشد [۴].

امروزه تحقیقات متنوعی در جهت به‌کارگیری استراتژی مناسب کنترل بلادرنگ به‌منظور کاهش تأخیر و دفع اثر اغتشاش‌های وارد شده به سیستم ترافیکی صورت گرفته است [۳]. در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه مدل‌سازی و کنترل بلادرنگ ترافیک انجام شده است که همواره برای این هدف نیازمند یک مدل مشخص از سیستم ترافیکی

هستیم. در [۱] و [۲] یک مدل گسسته پیشامد برای خطوط مترو ارائه شده است که شامل زمان اعزام^۳ حرکت قطارها، مدت زمان توقف^۴ در هر ایستگاه و بیان تأثیر حجم مسافران موجود در ایستگاه بر روی زمان توقف می‌باشد. [۱] و [۲] اولین تحقیقاتی هستند که با اشاره به ناپایداری در سیستم‌های ترافیکی به مدل‌سازی دینامیک زمان اعزام و ارائه سیستم کنترل بلادرنگ با هدف تنظیم ترافیک و از بین بردن تأخیر زمانی پرداخته‌اند. ولیکن در این دو مقاله، به قید بر روی زمان اعزام، سرفاصله زمانی^۵ (فاصله زمانی بین حرکت دو قطار متوالی) و مسائل ایمنی مرتبط توجه نشده است که می‌توان این مورد را یکی از نقاط ضعف این مقالات به شمار آورد. [۲] که کار خود را بر مبنای مدل‌سازی خطوط فرکانس بالا قرار داده است، شامل نقاط ضعفی می‌باشد که در ادامه مختصراً به آنها اشاره شده است. به‌طور کلی در مدل ارائه‌شده در [۲] مشاهده می‌شود که در صورتی که قطاری دچار تأخیر شود، در فاصله زمانی که قطار بعدی به ایستگاه برسد چون سرفاصله زمانی از حد معمول کمتر بوده تعداد مسافران کمتری در ایستگاه تجمع پیدا می‌کنند و این امر موجب می‌گردد که قطار بعدی زمان کمتری در ایستگاه منتظر بماند و در نتیجه از برنامه جدول زمان‌بندی جلوتر حرکت خواهد کرد. این فرایند به معنای نزدیک شدن بیش از حد قطارها به یکدیگر و در نتیجه باعث کاهش ایمنی و افت سرویس‌دهی به مسافران می‌شود. در [۲] از تنظیم‌کننده مربعی خطی^۶ به منظور تنظیم ترافیک و بازبایی تأخیر استفاده شده است ولیکن همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، متأسفانه هیچ‌گونه قید عملکردی بر روی متغیرهای حالت، خروجی و سیگنال کنترلی در نظر گرفته نشده است که این امر پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی را با چالش مواجه می‌نماید. البته از نکات قابل توجه و ارزشمند ارائه شده در [۲] می‌توان به مدل‌سازی و کنترل دو فرم خط باز ترافیکی^۷ و مسیر رفت و برگشتی^۸ و همچنین ارائه تحلیل‌های پایداری حلقه باز و حلقه بسته اشاره نمود.

در [۵] با استفاده از معادلات دینامیکی ارائه شده در [۲] و جایگزین نمودن مدل خطی زمان توقف قطار در هر ایستگاه با مدل غیرخطی، مدل جدیدی را برای دینامیک زمان اعزام قطارها ارائه می‌نماید. این مدل با در نظر گرفتن قيود عملیاتی، سایر نقاط ضعف مدل ارائه شده در [۲] را دارا بوده ولیکن نحوه اثرگذاری تعداد مسافران بر زمان توقف را با دقت بیشتری بررسی می‌نماید. ضمناً در [۵] به طراحی کنترل‌کننده بهینه تطبیقی در حضور قيود عملیاتی پرداخته شده که از نقاط قوت این تحقیق می‌باشد. این الگوریتم با استفاده از اطلاعات ترافیکی و با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی به تنظیم ترافیک و کاهش تأخیر زمانی می‌پردازد. در [۶] با توجه به مدل غیرخطی مشابه [۵]، نقاط ضعف گفته‌شده در [۵] را

³ Departure time⁴ Dwell time⁵ Headway⁶ Linear Quadratic Regulator (LQR)⁷ Open line⁸ Loop line¹ Real-time control² Delay recovery

در مقاله پیش رو، ابتدا مدلی غیرخطی از سیستم ترافیکی مترو ارائه می‌گردد که هدف آن رفع نواقص مدلهای ارائه‌شده در تحقیقات پیشین، همچون عدم توجه به پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر در مدل‌های پیشنهادی در آن تحقیقات است. این مدل بر مبنای زمان اعزام قطارها ارائه شده و در آن مسئله انتقال ضربه‌ای تأخیر از یک قطار به قطارهای بعدی لحاظ شده، که نتیجه آن مدل غیرخطی برای دینامیک زمان اعزام در یک مسیر رفت و برگشتی خطوط مترو بوده است. سپس با هدف جبران انحراف از جدول زمان‌بندی و انحراف از سرفاصله زمانی به طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی پرداخته شده است. این کنترل‌کننده به طراحی قانون کنترل مناسب با در نظر گرفتن افق پیش‌بینی برای خروجی سیستم و تلاش کنترلی و همچنین با حداقل کردن تابع هزینه‌ای که بر مبنای کاهش انحراف از زمان اعزام و تبعیت از سرفاصله زمانی نامی سیستم ترافیکی نوشته شده است، می‌پردازد. در مدل ارائه‌شده، سیگنال کنترلی با تغییر مدت زمان سفر بین دو ایستگاه به بازبازی تأخیر خواهد پرداخت. لازم به ذکر است که در استخراج قانون کنترل بهینه، قیده‌های عملیاتی بر روی سیگنال کنترلی و همچنین سرفاصله زمانی سیستم ترافیکی در نظر گرفته شده است که این امر جنبه‌های پیاده‌سازی عملیاتی روش پیشنهادی را به نحوه قابل توجهی تقویت می‌نماید.

مطالب این مقاله بدین صورت تنظیم شده است که در بخش دوم اصطلاحات و علائم موردنیاز جهت درک بهتر مفاهیم ارائه‌شده در مقاله، معرفی می‌گردد. قسمت سوم به مدلسازی انحراف از زمان اعزام قطارها در خطوط رفت و برگشتی مترو خواهد پرداخت. در بخش چهارم مقاله، تابع هزینه‌ای به منظور بهینه‌سازی و بازبازی تأخیر ارائه می‌گردد و همچنین قیود عملیاتی که بر سیستم ترافیکی حاکم است نیز معرفی می‌شود. در بخش پنجم به طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی برای سیستم ترافیکی خواهیم پرداخت. در بخش آخر، نتایج شبیه‌سازی به‌منظور نمایش عملکرد سیستم ترافیکی در دو حالت بدون حضور کنترل‌کننده، و همچنین تأثیر کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی مقید در جهت جبران تأخیر ارائه می‌شود.

۲- معرفی علائم و اصطلاحات

به‌منظور توصیف مدلسازی خطوط رفت و برگشتی مترو، به تعاریفی جهت درک بهتری از مدل ارائه‌شده در بخش‌های بعدی نیاز است که در این بخش به این موضوع پرداخته می‌شود. سیستم ترافیکی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تعدادی قطار در آن در حال حرکت هستند به طوری که قطارها از پارکینگ وارد حلقه‌ای مشابه شکل ۱ می‌شوند که ابتدا و انتهای آن به هم اتصال دارد و تعداد ایستگاه‌های موجود در آن با مقدار N در نظر گرفته می‌شود. تعداد قطارهای که در این حلقه وارد می‌شوند برابر M می‌باشد به طوری که پشت سر هم و به فاصله یک ایستگاه به مجموعه ترافیکی اعزام می‌شوند. از پارامترهای

همچنان شامل می‌شود و به منظور کنترل سیستم، روش کنترل بهینه تطبیقی را برای بهبود روش برنامه‌ریزی ابتکاری دوگانه^۱ به کار می‌گیرد. این ارزیابی نشان می‌دهد که روش کنترل تطبیقی بهینه‌قادر به پیدا کردن نزدیک‌ترین راه‌حل بهینه بسیار سریع‌تر از روش برنامه‌ریزی ابتکاری می‌باشد. لازم به ذکر است که در [۷] با در نظر گرفتن مسئله رضایت مسافران، با استفاده از مینیمم کردن تابع هزینه به روش گرادیان نزولی، به مقدار بهینه زمان اعزام و زمان ورود به ایستگاه دست خواهد یافت. [۸] نیز به منظور بازبازی تأخیر زمانی و تنظیم ترافیک، به مدلسازی شبکه‌های ریلی می‌پردازد. در این مقاله با بیان مدل میکروسکوپی و اشاره به بالا بودن حجم محاسبات و ضعف‌های این مدل، مدل دیگری تحت عنوان مدل ماکروسکوپی معرفی می‌شود و به مقایسه‌ای بین این دو مدل می‌پردازد. در [۹] یک معماری توزیع‌شده برای کنترل ترافیک ریلی با نام DARTCMAS ارائه می‌گردد که هدف آن استفاده از ایده سیستم‌های چند عامله در کنترل سیستم‌های ترافیک ریلی است.

از جمله سیستم‌های کنترل که در تنظیم اتوماتیک ترافیک ریلی و یا به‌عبارت‌دیگر بازبازی بلادرنگ تأخیر زمانی بکار گرفته‌شده و عملکرد موفق نیز داشته، سیستم‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل بوده است که در تحقیقات مختلف نظیر [۱۰]، [۱۱] و [۱۲] نیز به آن اشاره شده است. [۱۰] با در نظر گرفتن حلقه ترافیکی برای شبکه مترو مدل تنظیم‌کننده پیش‌بینی ترافیک را بر مبنای بهینه‌سازی تابع هزینه در افق زمانی مشخص معرفی می‌کند. این مقاله با طراحی تنظیم‌کننده در تلاش برای جبران انحراف از جدول زمان‌بندی و انحراف از سرفاصله زمانی موردنظر با تغییر زمان سفر^۲ بین دو ایستگاه بوده است. همچنین در [۱۱] با در نظر گرفتن مدل جدیدی که بر مبنای سرفاصله زمانی حرکت قطارها و مدل دینامیکی مسافران می‌باشد به توصیف ارزیابی سرفاصله زمانی قطارها و تعداد مسافران در شبکه مترو می‌پردازد. در این مقاله روش جدیدی برای محاسبه برنامه بهینه حرکت قطارها معرفی می‌کند که این روش از برنامه‌ریزی خطی بر مبنای فرمولاسیون کنترل پیش‌بین و با در نظر گرفتن قیود عملیاتی به منظور بازبازی تأخیر استفاده شده است. همچنین، در [۱۲] با هدف بازبازی تأخیر در تقاطع‌ها، با تغییر زمان اعزام حرکت قطارها، به مدلسازی سیستم ترافیکی می‌پردازد. به این منظور مدلی گسسته پیشامد با روش سویچینگ جمع‌حداکثر^۳ ارائه می‌کند و با به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل به بازبازی تأخیر با هدف کنترل اتوماتیک ترافیک می‌پردازد. [۱۳] با در نظر گرفتن تأثیر تعداد مسافران موجود در سکو و تعداد مسافران موجود در قطار و اثر آن بر زمان اعزام قطارها به ارائه مدل گسسته پیشامد برای سیستم ترافیکی می‌پردازد و با طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، ورودی قانون کنترلی بهینه را با در نظر گرفتن قیود عملیاتی به دست آورده و به سیستم اعمال می‌کند.

¹ Dual heuristic programming

² Running time

³ Switching max-plus

زمان توقف در ایستگاه موردنظر بستگی دارد.

جدول ۱: علائم و اصطلاحات

پارامتر	تعاریف
t_k^i	زمان اعزام قطار نام در ایستگاه k ام
r_k^i	زمان سفر واقعی قطار نام بین ایستگاه k ام و $k+1$ ام
d_{k+1}^i	مدت زمان توقف قطار نام در ایستگاه $k+1$ ام
R_k	زمان سفر نامی قطارها بین ایستگاه k ام و $k+1$ ام
T_k^i	زمان اعزام نامی قطار نام در ایستگاه k ام تعیین شده توسط جدول زمان بندی
Δt_k^i	انحراف زمان اعزام حرکت قطار نام در ایستگاه k ام از مقدار نامی
u_k^i	سیگنال کنترلی قطار نام جهت تنظیم زمان سفر بین ایستگاه k ام و $k+1$ ام
h_k	سرفاصله زمانی دینامیکی سیستم
H	سرفاصله زمانی نامی
D	حداقل زمان توقف قطار در هر ایستگاه به منظور ورود به سکو و باز و بسته شدن درها
C_{k+1}	نرخ تأخیر جهت تعیین مدت زمان توقف قطار در ایستگاه
t_B	مدت زمان حائل
\bar{w}	اغتشاشات ناشی از عوامل خارجی وارد بر زمان سفر
\tilde{w}	اغتشاشات ناشی از عوامل خارجی زمان توقف
W_k^i	مجموع اغتشاشات ناشی از عوامل خارجی قطار نام در ایستگاه k ام
\bar{f}	اغتشاشات ناشی از انتقال تأخیر به زمان سفر
\tilde{f}	اغتشاشات ناشی از انتقال تأخیر به مدت زمان توقف قطار
f_k^i	مجموع اغتشاشات ناشی از انتقال تأخیر
X_j^i	بردار حالت بیان کننده انحراف از زمان اعزام نامی قطارها
U_j^i	بردار کنترل جهت تنظیم خطوط ترافیکی
W_j^i	بردار اغتشاشات تعیین کننده اغتشاشات های بیرونی اعمال شده بر سیستم

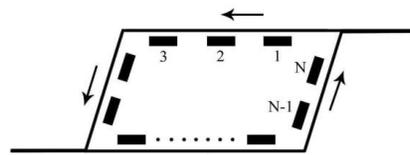
همچنین زمان سفر بین دو ایستگاه، r_k^i ، را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$r_k^i = R_k + u_k^i + \bar{f}_k^i + \bar{w}_k^i \quad (2)$$

رابطه (۲) نشان می دهد که زمان سفر تحت تأثیر زمان سفر نامی بین دو ایستگاه، R_k ، اغتشاشات ناخواسته بیرونی در زمان حرکت بین دو ایستگاه، \bar{w}_k^i ، اغتشاشات داخلی از جنس پدیده انتقال ضربه ای تأخیر، \bar{f}_k^i ، و تلاش کنترلی به عنوان ابزاری به منظور کاهش و/یا افزایش زمان سفر بین دو ایستگاه، u_k^i ، است.

با توجه به تعریف سرفاصله زمانی و زمان اعزام ارائه شده در بخش ۲، رابطه زیر را به منظور بیان ریاضی سرفاصله زمانی می توان ارائه نمود:

اصلی مدل سازی می توان به زمان اعزام قطارها، مدت زمان توقف در ایستگاه، زمان سفر بین دو ایستگاه اشاره کرد، که این بخش به معرفی این موارد می پردازد و همچنین به سایر پارامترهایی که در ادامه مهم خواهد بود به طور خلاصه اشاره می شود. علاوه بر مواردی که به آن اشاره شد جهت درک بهتر بخش های آینده به آشنایی با اصطلاحات و فرضیاتی که در مدل سازی استفاده می شود، نیازمندیم. از جمله این موارد می توان به "سرفاصله زمانی"، "انتقال تأخیر به صورت ضربه ای" و "زمان حائل" اشاره کرد:



شکل ۱: مسیر رفت و برگشتی خطوط مترو

سرفاصله زمانی: فاصله زمانی بین حرکت دو قطار متوالی از دیدگاه یک نقطه ثابت در مسیر خط ریلی [۱۴] و [۱۵].

انتقال ضربه ای تأخیر [۱۶]: عبارت است از پدیده ای که در صورت رخ دادن تأخیر در یک قطار و عقب ماندن آن از برنامه زمان بندی، این تأخیر به قطارهای پشت سر آن منتقل می شود.

زمان حائل [۱۵]: مدت زمان اختلاف مابین حداقل سرفاصله زمانی و سرفاصله زمانی نامی.

علاوه بر اصطلاحاتی که پیش تر اشاره شد علائمی نیز در ادامه مقاله مورد استفاده قرار می گیرد که با هدف درک ساده تر و بهتر توسط خوانندگان در جدول ۱ معرفی شده اند. توجه گردد همان گونه که در جدول نیز مشخص است اندیس های بالا بیان کننده شماره قطار و اندیس های پایین بیان کننده شماره ایستگاه می باشند.

۳- مدل سازی دینامیک زمان اعزام قطارها در

یک مسیر رفت و برگشتی خطوط مترو

در این قسمت با ارائه یک مدل گسسته پیشامد به بیان روابط دینامیکی توصیف کننده سیستم ترافیکی خواهیم پرداخت. در این مقاله تعداد قطارها، تعداد ایستگاه ها، سرفاصله زمانی موردنظر و تعداد مسافرانی که در یک ثانیه وارد ایستگاه می شوند ثابت در نظر گرفته می شود [۲]. ضمناً فرض بر این است که زمان سفر بین دو ایستگاه بستگی به تعداد مسافران داخل قطار ندارد که فرض منطقی محسوب می گردد.

زمان اعزام هر قطار را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + r_k^i + d_{k+1}^i \quad (1)$$

رابطه (۱) نشان می دهد که زمان اعزام هر قطار در هر ایستگاه به زمان اعزام همان قطار در ایستگاه قبلی، به زمان سفر بین دو ایستگاه و مدت

¹ Knock on delay

^۲ Buffer time

$$\Delta t_k^i = t_k^i - T_k^i \quad (11)$$

همان‌گونه که در مقدمه مقاله نیز اشاره شد یکی از موارد مهم در بحث مدل‌سازی لحاظ کردن پدیده انتقال تأخیر در خطوط مترو به‌منظور حفظ مسئله ایمنی می‌باشد. به‌گونه‌ای در صورت رخ دادن تأخیر در یک قطار و عقب ماندن آن از برنامه زمان‌بندی این تأخیر به قطارهای پشت سر آن منتقل می‌شود تا از برخورد جلوگیری شود که این پدیده با عنوان انتقال ضربه‌ای تأخیر معرفی می‌شود. این تأخیر در برخی از موارد به قطارهای پشت سر منتقل نخواهد شد و این امر زمانی اتفاق می‌افتد که ایمنی سیستم به خطر نیفتد. در واقع اگر میزان تأخیر به وجود آمده در قطار، کمتر یا برابر با زمان حائل باشد این تأخیر به قطارهای پشت سر انتقال پیدا نمی‌کند و سایر قطارها به حرکت عادی خود ادامه می‌دهند. لازم به ذکر است که حداقل سرفاصله زمانی مدت زمانی است که اگر فاصله زمانی حرکت قطارها کمتر از آن باشد، ایمنی حرکت به خطر می‌افتد. توجه به این نکته ضروری است که اگر قطاری که دارای تأخیر باشد و قطار پشت سر هم از برنامه زمانی خود عقب باشد (دارای تأخیر باشد)، مقدار تأخیر منتقل شده از قطار جلویی به عقبی برابر اختلاف تأخیر دو قطار متوالی نسبت به زمان حائل خواهد بود و با توجه به این توضیحات و تعریف اغتشاشات ناشی از پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر، تعریف زمان حائل و رابطه (۸) می‌توان به‌سادگی نشان داد که f_k^i تابعی از سه متغیر $\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B$ است. لذا رابطه (۱۰) را می‌توان به‌صورت رابطه زیر بازنویسی نمود که در درک بهتر روابط بعدی کارآمد می‌باشد.

$$t_{k+1}^i = t_k^i + T_{k+1}^i - T_k^i - c_{k+1} H_{k+1} + c_{k+1} (t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1}) + w_k^i + f_k^i (\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B) + u_k^i \quad (12)$$

مطابق تعریف تابع $f_k^i (\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B)$ را می‌توان به‌صورت معادله زیر در نظر گرفت:

$$f_k^i (\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B) = \begin{cases} 0 & \Delta t_{k+1}^{i-1} - \Delta t_k^i \leq t_B \\ \Delta t_{k+1}^{i-1} - \Delta t_k^i - t_B & \Delta t_{k+1}^{i-1} - \Delta t_k^i > t_B \end{cases} \quad (13)$$

که البته رابطه (۱۳) را به‌صورت زیر نیز می‌توان نمایش داد:

$$f_k^i (\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B) = u (\Delta t_{k+1}^{i-1} - \Delta t_k^i - t_B) \times (\Delta t_{k+1}^{i-1} - \Delta t_k^i - t_B) \quad (14)$$

$$u(X) = \begin{cases} 1 & X > 0 \\ 0 & X \leq 0 \end{cases}$$

از سوی دیگر با استفاده از (۱۱) و (۱۲)، دینامیک انحراف از زمان اعزام نامی برای هر قطار در هر ایستگاه به‌صورت تابعی از تأخیر همان قطار در

$$h_{k+1}^i = t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1} \quad (3)$$

به همین ترتیب زمان توقف قطار را می‌توان به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$d_{k+1}^i = D + c_{k+1} (t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1}) + \tilde{f}_{k+1}^i + \tilde{w}_{k+1}^i \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان می‌دهد که زمان توقف قطار مشابه زمان سفر وابسته به حداقل زمان توقف، D ، اغتشاش وارد شده از خارج به سیستم، \tilde{w}_{k+1}^i ، و اغتشاشات ناشی از پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر، \tilde{f}_{k+1}^i ، می‌باشد. همچنین زمان توقف قطار در ایستگاه رابطه مستقیم با حجم مسافران داخل ایستگاه دارد و با افزایش حجم مسافران داخل ایستگاه لازم خواهد بود که قطار مدت زمان بیشتری در ایستگاه توقف کند. از سوی دیگر، حجم مسافران موجود در ایستگاه به فاصله زمانی اعزام دو قطار متوالی از ایستگاه بستگی دارد به‌گونه‌ای که هرچه فاصله زمانی بیشتر باشد مسافران بیشتری در ایستگاه تجمع خواهند کرد و زمان توقف در ایستگاه نیز بیشتر می‌شود. این مفهوم با عبارت $c_{k+1} (t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1})$ در رابطه (۴) نشان داده شده است. با توجه به روابط (۱) - (۴) رابطه زیر را به‌منظور توصیف دینامیک زمان اعزام می‌توان ارائه نمود.

$$t_{k+1}^i = t_k^i + R_k + \bar{f}_k^i + \bar{w}_k^i + D + c_{k+1} (t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1}) + \tilde{f}_{k+1}^i + \tilde{w}_{k+1}^i + u_k^i \quad (5)$$

مشابه روابط (۳) و (۵) به سادگی برای حالت نامی داریم:

$$T_{k+1}^i = T_k^i + R_k + D + c_{k+1} H_{k+1} \quad (6)$$

$$H_{k+1} = T_{k+1}^i - T_{k+1}^{i-1} \quad (7)$$

روابط (۶) و (۷) به‌منظور بیان ارتباط ریاضی زمان اعزام نامی، سرفاصله زمانی نامی و زمان سفر نامی قابل ارائه است. واضح است که با توجه به اینکه این روابط در حالت نامی بیان شده‌اند، روابط (۶) و (۷) شامل هیچ‌گونه اغتشاش، تأخیر و سیگنال کنترلی نمی‌باشند.

با تعریف

$$f_k^i = \bar{f}_k^i + \tilde{f}_{k+1}^i \quad (8)$$

$$w_k^i = \bar{w}_k^i + \tilde{w}_{k+1}^i \quad (9)$$

و استفاده از رابطه (۶) و (۷)، می‌توان رابطه (۵) را به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + T_{k+1}^i - T_k^i - c_{k+1} H_{k+1} + c_{k+1} (t_{k+1}^i - t_{k+1}^{i-1}) + w_k^i + f_k^i + u_k^i \quad (10)$$

همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، هدف این مقاله مدل‌سازی دینامیک ترافیک بر اساس زمان اعزام و کنترل کاهش انحراف از زمان‌های اعزام نامی در جدول زمان‌بندی و همچنین کاهش انحراف از سرفاصله زمانی نامی می‌باشد. به همین دلیل Δt_k^i به‌عنوان انحراف از زمان اعزام نامی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد که حرکت دادن آن به سمت مقدار صفر به‌منزله برآورده شدن هدف مدنظر یعنی تنظیم بلادرنگ ترافیک است.

لازم است به این نکته توجه گردد که همان گونه که پیش تر اشاره شد، تعداد قطارها و ایستگاهها به صورت مستقل و با مقادیر M و N مشخص شده اند که این امر موجب می گردد که معادله دینامیکی توانایی مدل سازی دینامیک ترافیک را با هر تعداد قطار و ایستگاه داشته باشد. با توجه به معادله دینامیکی سیستم، تعداد ایستگاههای بردار حالت با مقادیر M و N رابطه مستقیم دارند و از این جهت محدودیتی در جهت تولید وضعیت های مختلف با هر قطار و هر ایستگاه وجود ندارد. از این رو هنگام شبیه سازی معادلات می توان تعداد قطارها و ایستگاهها را به صورت دلخواه در نظر گرفت، البته لازم به ذکر است که تعداد قطارها حداکثر می تواند برابر تعداد ایستگاهها منهای یک باشد. در این مقاله فرض بر این است که قطارها پشت سر هم وارد می شوند و اگر قطار اول در ایستگاه چهارم باشد قطار دوم در ایستگاه سوم و به همین ترتیب سایر قطارهای دیگر وارد مجموعه خواهند شد. نکته ای که در اینجا مطرح می گردد این است که در برخی از خطوط با سرفاصله زمانی پایین، قطارها به فاصله یکی در میان در ایستگاهها قرار خواهند گرفت، یعنی قطاری اگر ایستگاه شماره ۵ باشد قطار پشت سرش در ایستگاه شماره ۳ خواهد بود و با توجه به مدل سازی ارائه شد در این مقاله می تواند قطاری را در ایستگاه شماره ۴ به عنوان قطار مجازی در نظر گرفت به گونه ای که به قطار مذکور در این ایستگاه اجازه وارد شدن هیچ اغتشاش خارجی وجود نخواهد داشت و صرفاً جهت مطابقت با مدل پیشنهادی می توان از این استراتژی استفاده کرد [۱۷].

۴- تابع هزینه و قیود حاکم بر مسئله

همان گونه که گفته شد هدف ما در این مقاله، بازیابی تأخیر در یک سیستم ترافیکی مترو است. برای این هدف به تابع هزینه ای در جهت دست یافتن به اهداف سیستم ترافیکی نیاز خواهیم داشت که حداقل کردن آن بتواند موجب دست یافتن به قانون کنترل بهینه و اهداف مدنظر ذکر شده در بخش مقدمه گردد. این بخش به معرفی تابع هزینه و هدف آن و بیان قیود حاکم بر سیستم خواهد پرداخت.

۴-۱- تابع هزینه

با توجه به معادلات فضای حالت سیستم که در (۱۷) ارائه شد، حالت های سیستم انحراف از زمان اعزام نامی می باشد. که یکی از اهداف ما نزدیک کردن زمان اعزام قطارها به زمان های اعزام نامی است که توسط جدول زمان بندی از قبل مشخص شده است.

$$X_{j+1}^i = F(X_j^i, W_j^i, U_j^i) = [f_m]_{N \times 1}, \quad m \in [1, N], \quad i \in [1, M]$$

$$R = N - M$$

$$f_m = \begin{cases} X_{j, (m+1)}^i & m \leq N - M \\ \alpha X_{j,m}^i + \beta X_{j, (m+1)}^i + \alpha f_j^i (X_{j,m}^i, X_{j, (m+1)}^i, t_B) + \alpha U_{j, m-R}^i + \alpha W_{j, (m-R)}^i & N - M < m < N \\ \alpha X_{j,m}^i + \beta X_{j,1}^i + \alpha f_j^i (X_{j,m}^i, X_{j,1}^i, t_B) + \alpha U_{j, m-R}^i + \alpha W_{j, (m-R)}^i & m = N \end{cases} \quad (17)$$

ایستگاه قبلی و تأخیر قطار پیشین در ایستگاه پیش رو به صورت رابطه زیر قابل ارائه می باشد.

$$\Delta t_{k+1}^i = \alpha \Delta t_k^i + \beta \Delta t_{k+1}^{i-1} + \alpha w_k^i + \alpha f_k^i (\Delta t_k^i, \Delta t_{k+1}^{i-1}, t_B) + \alpha u_k^i \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - c_{k+1}}, \quad \beta = -\frac{c_{k+1}}{1 - c_{k+1}}$$

با هدف نوشتن معادلات حالت توصیف کننده سیستم که متشکل از N ایستگاه می باشد، اگر انحراف از زمان اعزام هر قطار که در مجموعه قرار دارد را به عنوان متغیرهای بردار حالت در نظر بگیریم M سطر آخر بردار به انحراف زمانی تمامی قطارهایی که وارد مجموعه شده اند اختصاص داده می شود و با توجه به معادله (۱۵) قابل محاسبه می شوند. لازم به ذکر است که ما به تعداد قطارها در مدل سازی معادله حالت داریم و نظر به اینکه چه تعداد قطار در خطوط مترو وارد شده باشند از معادله مربوطه استفاده می کنیم. $N-M$ سطر اول آن مربوط به انحراف زمانی های قطار مورد نظر در ایستگاه های قبلی هستند.

با توجه به این نکته که ما در یک مسیر رفت و برگشتی مترو حرکت می کنیم در دور اول جلوی قطار اول، قطاری وجود ندارد ولی در دورهای بعدی قطار آخر قطار جلویی قطار اول محسوب می شود که دلیل وجود $N-M$ سطر اول محسوب می شود. با توجه به این توضیحات، بردارهای حالت به صورت زیر در نظر گرفته می شود. که با انتخاب بردارهای فضای حالت مورد نظر و استفاده از معادله (۱۵) مدل دینامیکی غیر خطی در پایین صفحه برای یک مسیر رفت و برگشتی به دست می آید.

$$X_j^i = \begin{bmatrix} \Delta t_{j-N}^i & \Delta t_{j-N+1}^i & \dots \\ \Delta t_{j-M-1}^i & \Delta t_{j-M}^i & \dots & \Delta t_{j-1}^{i-M+1} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$U_j^i = \begin{bmatrix} u_{j-M}^{i-1} & u_{j-M+1}^{i-1} & \dots & u_{j-1}^{i-M+1} \end{bmatrix}^T$$

$$W_j^i = \begin{bmatrix} w_{j-M}^{i-1} & w_{j-M+1}^{i-1} & \dots & w_{j-1}^{i-M+1} \end{bmatrix}^T$$

همان گونه که در معادله (۱۷) مشاهده می شود ضابطه اول تولید کننده $N-M$ سطر اول معرف برخی از ایستگاه های بردار حالت کنونی است می باشد. ضابطه دوم و سوم از رابطه (۱۵) برای محاسبه انحراف زمانی آینده سیستم استفاده می کنند. دلیل تفکیک ضابطه سوم از دوم قرار گرفتن قطار آخر به عنوان قطار جلویی قطار اول می باشد.

می گردد، لذا حداکثر زمان سفری برای هر قطار بین دو ایستگاه لحاظ می گردد که بر اساس آن حد بالای سیگنال کنترل تعیین می شود. در مقابل حداکثر سرعت قطار نیز دارای محدودیت های از جنس ایمنی است که بر اساس آن حد پایین سیگنال کنترل تعیین می گردد.

$$U_{\min} \leq U_i^k \leq U_{\max} \quad (20)$$

• قید سرفاصله زمانی

حرکت دو قطار متوالی از یک نقطه نمی تواند با فاصله زمانی کوتاه تر از حداقل سرفاصله زمانی صورت بگیرد. این رخداد موجب عدم رعایت مسائل ایمنی می شود که وجود قید بر روی سرفاصله زمانی از این مسئله جلوگیری می کند. حد بالای این قید با توجه به سرفاصله زمانی نامی و حداقل سرفاصله زمانی به صورت زیر تعیین می شود.

$$\Delta t_k^i - \Delta t_k^{i-1} > H_{\min} - H \quad (21)$$

توجه نمایید که قید بر روی زمان توقف در این مقاله لحاظ نشده است، چرا که در طراحی کنترل کننده پیشنهادی، کنترلی برای کنترل زمان توقف به منظور بازیابی تأخیر لحاظ نگردیده است.

۵- طراحی کنترل کننده

کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل یکی از کنترل کننده های رایج در صنعت می باشد [۱۸]. این کنترل کننده بر اساس مدل صریحی از سیستم، رفتار آینده فرایند را پیش بینی و کنترل می کند، به طوری که در هر بازه کنترلی با در نظر گرفتن افق پیش بینی و افق کنترلی به محاسبه رشته ای از تنظیمات متغیرهای مورد نظر به منظور بهینه کردن رفتار آینده می پردازد. این دسته از کنترل کننده ها با حداقل کردن انحراف متغیرهای کنترل شونده از مقدار مطلوبشان از طریق حداقل سازی تابع هزینه که بر مبنای مربعات خطاهای پیش بینی سیستم نوشته می شود به قانون کنترلی بهینه دست پیدا می کنند. اولین دنباله از این قانون بهینه به سیستم اعمال می شود و برای مراحل بعدی مراحل بهینه سازی مجدداً تکرار خواهد شد. از مزیت های مهم کنترل کننده های پیش بین می توان به قابلیت تعمیم این کنترل کننده ها به سیستم های چند متغیره اشاره کرد. این کنترل کننده ها می توانند در حضور قیود قانون کنترل بهینه سیستم را در افق مدنظر محاسبه نمایند که این امر از ویژگی های مهم این دسته از کنترل کننده محسوب می گردد [۱۲] و [۱۹]. از خصوصیات دیگر این کنترل کننده ها می توان به امکان استفاده از نسخه غیرخطی آن ها برای سیستم های غیرخطی اشاره کرد. در این روش با در نظر گرفتن معادلات سیستم به صورت غیرخطی و بیان الگوریتم پیش بین برای سیستم مورد نظر، ارائه تابع هزینه و حداقل کردن آن با روش های حل عددی به قانون کنترلی بهینه می توان دست یافت [۲۰].

۵-۱- فرموله سازی مسئله برای طراحی کنترل کننده

پیش بین

با در نظر گرفتن معادلات غیرخطی ارائه شده در (۱۷) و اهداف کنترلی مدنظر و با توجه به قیود حاکم بر سیستم، استفاده از کنترل پیش بین غیرخطی مناسب به نظر می رسد. در این قسمت به بیان روابط کلی و الگوریتم کنترل

در کنار این بحث یکی از مواردی مهمی که در موضوع کنترل اتوماتیک ترافیک مطرح است بحث رضایت مسافران می باشد، به گونه ای که نحوه اعزام قطارها باید در جهتی باشد که زمان انتظار مسافران بیش از حد نباشد که این مسئله باعث عدم رضایت مسافران و تجمع بیش از حد آن ها در ایستگاه می شود.

به بیان دیگری می توان گفت علاوه بر اینکه ما سعی داریم انحراف از زمان اعزام را کاهش دهیم به تبعیت از سرفاصله عملیاتی سیستم ترافیکی به منظور رضایت مسافران نیازمندیم [۲]. به همین منظور تابع هزینه به صورت زیر معرفی شده است [۲].

$$J = (X_{j+1}^i)^T P (X_{j+1}^i) + (X_{j+1}^i - S_N X_j^i)^T Q (X_{j+1}^i - S_N X_j^i) + (U_j^i)^T U_j^i \quad (18)$$

$$S_N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (19)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0_{R \times R} & 0 \\ 0 & p \times I_{M \times M} \end{bmatrix}_{N \times N}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0_{R \times R} & 0 \\ 0 & q \times I_{M \times M} \end{bmatrix}_{N \times N}$$

جمله اول در رابطه (۱۸) نشان دهنده انحراف از زمان اعزام قطار، جمله دوم تبعیت از سرفاصله زمانی به منظور رضایت مسافران و جمله آخر بیان کننده نقش سیگنال کنترلی در تابع هزینه می باشد. با بهینه سازی تابع هزینه به سیگنال کنترل بهینه مدنظر سیستم ترافیکی به منظور تنظیم ترافیک و بازیابی تأخیر زمانی دست پیدا خواهیم کرد. توجه نمایید که با توجه به رابطه (۲)، منفی بودن سیگنال کنترل به معنای کاهش زمان سفر بین دو ایستگاه و مثبت بودن آن به معنای افزایش زمان سفر می باشد.

۴-۲- قیود عملیاتی حاکم بر مسئله

• قید حاکم بر سیگنال کنترل

همان گونه که توضیح داده شد سیگنال کنترلی اعمالی به منظور پایدارسازی سیستم نباید تناقضی با مسائل مربوط به بهره برداری داشته باشد. به عبارت دیگر، کاهش یا افزایش زمان سفر در نتیجه افزایش یا کاهش سرعت قطار می باشد و از آنجایی که سرعت در طول خط دارای محدودیت است، لذا محدودیت روی سرعت قطار در طول خط لازم است با محدودیت های معادل بر روی سیگنال کنترلی در طراحی سیستم کنترل لحاظ گردد.

حد بالای سیگنال کنترل متناظر حداقل سرعت قطار در سیستم ترافیکی می باشد. با توجه به اینکه مسیر تحت بهره برداری است و حرکت با سرعت پایین قطار به معنای اشغال ماندن خط و عدم امکان استفاده توسط بهره بردار را موجب

$$\bar{S}_N = \begin{bmatrix} S_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_N & \ddots & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & S_N \end{bmatrix}_{(P_y \times N) \times (P_y \times N)}$$

مشابه آنچه در بخش ۴ توضیح داده شد، عبارت اول رابطه (۲۵)، انحراف از زمان اعزام، عبارت دوم انحراف از سرفاصله زمانی (رضایت مسافران) و جمله آخر قانون کنترلی را در افق پیش بینی مدنظر نشان می دهد. لازم به یادآوری است که بهینه سازی تابع هزینه (۲۵) در حضور قیدهای (۲۰) و (۲۱) لازم است انجام پذیرد.

با توجه به غیرخطی بودن مدل دینامیک ترافیک و وجود قیود حاکم بر مسئله، یافتن حل بهینه جامع برای تابع هزینه به صورت تحلیلی و به سادگی ممکن نبوده و در این موارد از حل های عددی استفاده می شود. یکی از روش های حل عددی استفاده از الگوریتم SQP می باشد. این روش مسائل بهینه سازی مقید با تابع هزینه به فرم غیرخطی را در حضور قیود حل می کند. [۲۲] و [۲۳].

در این قسمت الگوریتمی از اعمال بهینه سازی را مشاهده می کنیم:

الگوریتم بهینه سازی کنترل پیش بین غیرخطی

مرحله اول:	$j=1$ و $i=M$ قرار می دهیم.
مرحله دوم:	تعریف مقدار اولیه برای X_j^i
مرحله سوم:	تعیین مقدار اغتشاشات (W_j^i)
مرحله چهارم:	با توجه به مشخص کردن پارامترهای مجهول مثل زمان حائل و ...، X_j^i را در رابطه (۲۳) قرار داده و Y_j^i محاسبه می شود.
مرحله پنجم:	با در نظر گرفتن تابع هزینه (۲۵)، و با استفاده روش حل عددی بر مبنای الگوریتم SQP، \bar{U}_j^i محاسبه می شود.
مرحله ششم:	تنها M سطر اول \bar{U}_j^i ، $\bar{U}_j^i \rightarrow U_j^i$ در معادله (۲۲) به سیستم اعمال و X_{j+1}^i محاسبه می شود.
مرحله هفتم:	به مقدار j یک واحد اضافه گشته و به مرحله سوم بازگردید. این فرآیند به تعداد ایستگاه ها در دوره های متوالی قطار در مسیر رفت و برگشتی تکرار می شود.

پیش بین غیرخطی پرداخته و سپس الگوریتم پیش بین غیرخطی [۲۱] به منظور تنظیم ترافیک ارائه شده و از آن برای محاسبه قانون کنترل بهینه در حضور قیود عملکردی استفاده می شود. با توجه به معادلات حالت سیستم و نیز توجه به این نکته که تمامی متغیرهای حالت، لازم است تحت کنترل باشند واضح به نظر می رسد که سیستم مدنظر یک سیستم چند ورودی-چند خروجی می باشد. همان گونه که به آن اشاره شد متغیرهای حالت که توصیف کننده زمان اعزام قطارها در مسیر رفت و برگشتی می باشند در معادله زیر قابل مشاهده است:

$$\begin{aligned} X_{j+1}^i &= F(X_j^i, W_j^i, U_j^i) \\ y_j^i &= X_j^i \end{aligned} \tag{۲۲}$$

به منظور پیش بینی آینده سیستم معادلات به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{j+1|j}^i &= X_{j+1|j}^i = F[X_{j|j}^i, U_{j|j}^i] \\ &= G_1[X_{j|j}^i, U_{j|j}^i] \Rightarrow G_1 = F \\ \bar{Y}_{j+2|j}^i &= F[X_{j+1|j}^i, U_{j+1|j}^i] \\ &= G_2[X_{j|j}^i, U_{j|j}^i, U_{j+1|j}^i] \\ &\vdots \\ \bar{Y}_{j+P_y|j}^i &= G_{P_y}[X_{j|j}^i, U_{j|j}^i, U_{j+1|j}^i, \dots, U_{j+P_y-1|j}^i] \end{aligned} \tag{۲۳}$$

که در این رابطه افق پیش بینی و افق کنترلی به صورت P_u و P_y تعریف می شوند و همچنین توابع G_1 تا G_{P_y} ترکیبی از توابع غیرخطی می باشند. اغتشاشات وارد بر سیستم با W_j^i نشان داده می شود. لازم به یادآوری است که اغتشاشات فعلی در مسئله کنترل ترافیک از جنس تأخیر زمانی بوده و مقادیر معلومی می باشند، ولیکن مقادیر آن ها در مراحل آینده نامعلوم هستند، لذا در فرایند طراحی و شبیه سازی نیز مقادیر آینده آن ها صفر در نظر گرفته شده است. با توجه به روابط (۲۳) دو بردار \bar{U}_j^i و Y_j^i که متشکل از مقادیر پیش بینی شده می باشند عبارت خواهند بود از:

$$\begin{aligned} \bar{U}_j^i &= [U_{j|j}^i \quad U_{j+1|j}^i \quad \dots \quad U_{j+P_u-1|j}^i]^T \\ Y_j^i &= [\bar{Y}_{j+1|j}^i \quad \bar{Y}_{j+2|j}^i \quad \dots \quad \bar{Y}_{j+P_y|j}^i] \end{aligned} \tag{۲۴}$$

لذا تابع هزینه سیستم (۲۳) و (۲۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$J = (Y_j^i)^T \bar{P} (Y_j^i) + (Y_j^i - \bar{S}_N Y_{j-1}^i)^T \bar{Q} (Y_j^i - \bar{S}_N Y_{j-1}^i) + (\bar{U}_j^i)^T (\bar{U}_j^i) \tag{line}$$

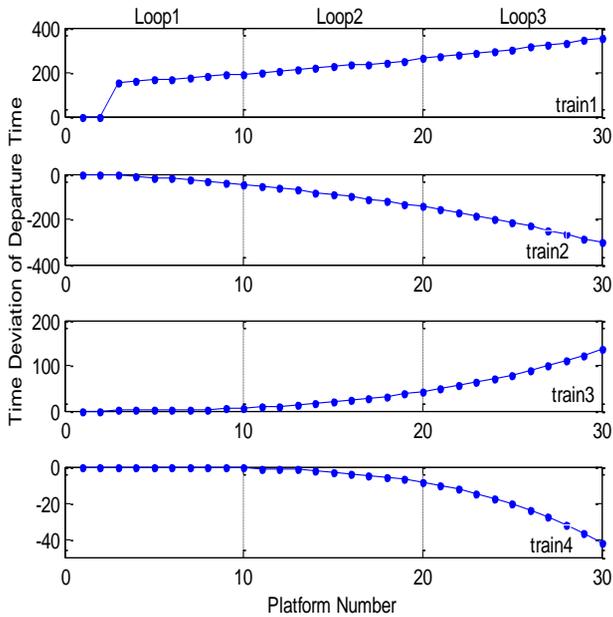
که در آن

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \begin{bmatrix} P & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P & \ddots & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & P \end{bmatrix}_{(P_y \times N) \times (P_y \times N)} \\ \bar{Q} &= \begin{bmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q & \ddots & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & Q \end{bmatrix}_{(P_y \times N) \times (P_y \times N)} \end{aligned}$$

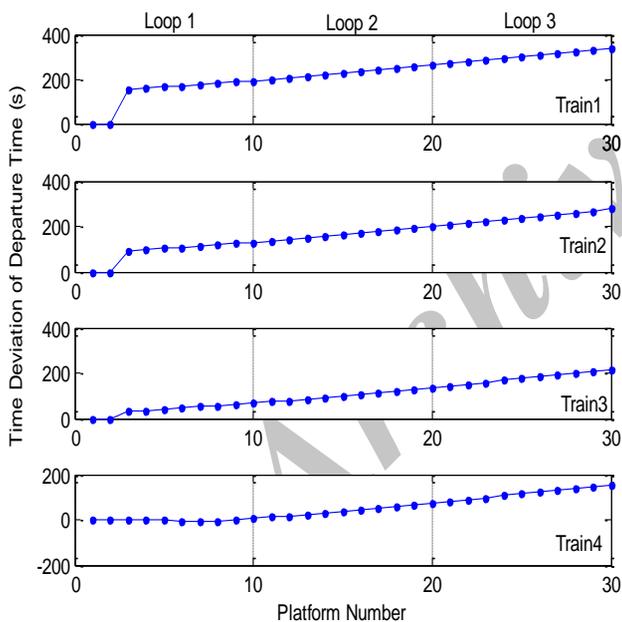
۶- نتایج شبیه سازی

این بخش، ابتدا به شبیه سازی مدل ارائه شده برای سیستم ترافیکی و مقایسه آن با مدل های ارائه شده در تحقیقات پیشین می پردازد. همچنین قسمت دوم این بخش، به طراحی و شبیه سازی سیستم کنترل پیش بین غیرخطی با هدف تنظیم ترافیک و بازیابی تأخیر زمانی خواهد پرداخت.

۶-۱- بررسی مدل ارائه شده و مقایسه با مدل های پیشین



شکل ۲: انحراف زمانی سیستم ترافیک مترو بر اساس معادلات ارائه شده در تحقیقات پیشین (بدون لحاظ کردن انتقال ضربه‌ای تأخیر) بدون جبران‌ساز



شکل ۳: انحراف زمانی در مدل پیشنهادی بدون جبران‌ساز

۲-۶- نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل کننده پیش‌بین

غیرخطی

در این بخش با اعمال کنترل کننده پیش‌بین غیرخطی به سیستم ترافیک ارائه شده در (۱۷) و با در نظر گرفتن قیود عملیاتی بر روی قانون کنترلی و انحراف از میزان سرفاصله زمانی، نتایج شبیه‌سازی سیستم تحت کنترل به منظور جبران تأخیر ارائه می‌شود.

همان گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، مدل‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین دارای ایراداتی می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها عدم لحاظ نمودن پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر است. مدل ارائه شده، (۱۷)، در این مقاله با هدف رفع این نقص عمده ارائه گردید که در این بخش با ارائه شبیه‌سازی، مقایسه‌ای مابین مدل حاضر و مدل پیشین انجام می‌پذیرد.

در شبیه‌سازی حاضر، نتایج عملکرد سیستم در حالت بدون کنترل کننده و بدون حضور قید ولیکن در حضور اغتشاش مورد توجه قرار گرفته است. اهداف شبیه‌سازی، نمایش عملکرد کلی سیستم، نشان دادن پدیده رشد تأخیر و همچنین مقایسه مدل ارائه شده با مدل‌های پیشین است. در این شبیه‌سازی، قطارها سه مرتبه مسیر رفت و برگشتی ترافیکی را دور می‌زنند و پارامترهای این سناریو به همراه مقادیر اولیه شبیه‌سازی به صورت جدول شماره ۲ تنظیم شده است. همان گونه که در جدول ۲ نیز مشخص است اغتشاش وارد به سیستم ترافیکی، تأخیر به وجود آمده در اعزام قطار اول در ایستگاه دوم به مقدار ۱۵۰ ثانیه می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای شبیه‌سازی بخش ۶-۱

N	۱۰
M	۴
c_{k+1}	۰.۰۳
H_{min}	۱۸۰ ثانیه
t_B	۶۰ ثانیه
$H = H_{min} + t_B$	۲۴۰ ثانیه
w_2^1	۱۵۰ ثانیه

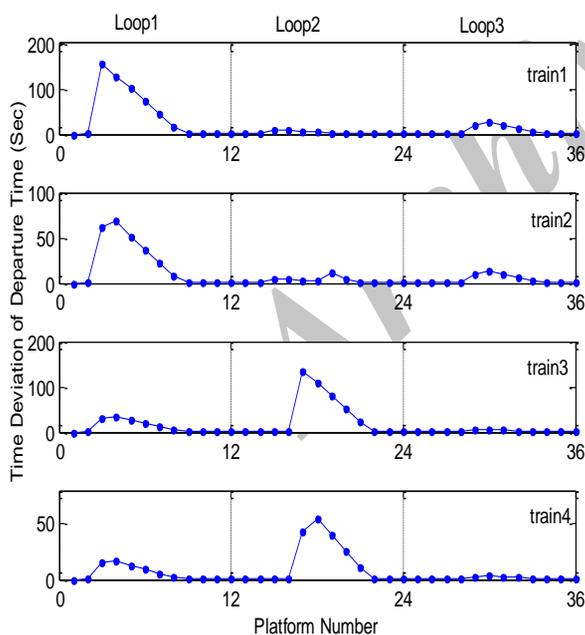
در شکل ۲، نتایج شبیه‌سازی مدل دینامیکی ترافیکی ارائه شده در [۱]، [۲] و [۵] ارائه می‌شود. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود با رخ دادن تأخیر در یک قطار، قطار پشت سر آن چون مدت زمان کمتری در ایستگاه به دلیل تجمع کمتر مسافران می‌ایستد زودتر از برنامه خود حرکت می‌کند. این فرآیند باعث می‌شود یک قطار جلوتر از برنامه (انحراف زمانی منفی نشان‌دهنده حرکت جلوتر از برنامه جدول زمان‌بندی) و قطار دیگر دیرتر از برنامه حرکت کند که این عملکرد بسیار از عملکرد واقعی سیستم ترافیک ریلی دور است. به عبارت دیگر در این مدل‌ها پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر در مدل‌سازی لحاظ نگردیده است و واضح است که پس از گذشت مدت زمانی قطارها به یکدیگر می‌رسند.

در اینجا به منظور ایجاد امکان مقایسه مدل‌ها، مدلی که در (۱۷) ارائه شد مشابه آنچه در بالا گفته شد، مورد توجه قرار گرفته است که در شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی آن دیده می‌شود. همان گونه که در این شکل مشخص است، تأخیر اعمال شده در ایستگاه دوم برای اعزام قطار اول به اندازه ۱۵۰ ثانیه بوده است که با در نظر گرفتن زمان حائل و رابطه (۱۷) به صورت ضربه‌ای به قطارهای پشت سر منتقل می‌شود. همان گونه که مشخص است برخلاف مدل پیشین و شکل ۲، قطارهای بعدی نیز دچار تأخیر می‌شوند ولیکن دو نکته مهم در شکل دیده می‌شود، یکی اینکه تأخیر تمامی قطارها در طول خط افزایش می‌یابد و ثانیاً اینکه قطارهای بعدی دارای تأخیر کمتری می‌باشند.

با توجه به شکل ۵ محدودیت ۳۰ ثانیه روی سیگنال کنترلی به خوبی مشخص است و در نهایت سیستم پایدار و میزان تأخیر به صفر رسیده است و سیگنال کنترلی هم به صفر میل می کند.

در شکل ۶ انحراف از سرفاصله زمانی نامی در هر ایستگاه نیز برای سیستم تحت کنترل دیده می شود. با توجه به تأخیر قطار اول در ایستگاه دوم به اندازه ۱۵۰ ثانیه و قطار دوم در همان ایستگاه به اندازه ۶۰ ثانیه، انحراف از سرفاصله زمانی ۹۰- در ایستگاه شماره ۲ به طور واضح مشخص است. به همین ترتیب برای ایستگاه های بعدی نیز این فرآیند تکرار می شود.

همان گونه که در شکل دیده می شود برای هر قطار یک نمودار و در نهایت چهار نمودار دیده می شود که هر یک نشان دهنده اختلاف سرفاصله زمانی هر دو قطار متوالی در هر ایستگاه می باشد. باید به این نکته توجه شود که قطار اول در دور اول، چون قطاری جلوی آن وجود ندارد انحراف از سرفاصله زمانی نیز برای آن تعریف نمی شود و مقدار انحراف از سرفاصله زمانی در شبیه سازی صفر در نظر گرفته شده است. با توجه به پارامترهای شبیه سازی، انحراف سرفاصله زمانی با توجه به قید نمی تواند از ۶۰- کمتر باشد که این امر در شکل ۶ مشخص است. در اولین تأخیر و تأخیر قطار سوم در ایستگاه شانزده چون به صورت ناگهانی رخ می دهد و کنترلی بر روی ورود اغتشاش نداریم این مقدار از ۶۰- کمتر است ولی با توجه به اعمال کنترل کننده در مراحل بعدی و حضور قیود بهینه سازی این مقدار از ۶۰- بیشتر است. با اعمال کنترل کننده، از یک قطار به قطار بعدی انحراف به وجود آمده کمتر و در نهایت به صفر می رسد.



شکل ۴: انحراف زمان اعزام قطارها از مقدار نامی در حضور کنترل کننده پیش بین غیرخطی مقید

مقادیر عددی پارامترها در این شبیه سازی در جدول شماره ۳ قابل مشاهده است. قطار سه مرتبه در مسیر رفت و برگشتی حرکت می کند. میزان اغتشاش، همان طور که در جدول آمده است به قطار اول در ایستگاه دوم و قطار سوم در ایستگاه شانزده اعمال می شود. لازم به ذکر است چون ما در یک مسیر رفت و برگشتی حرکت می کنیم و تعداد ایستگاه ها ۱۲ عدد می باشد، منظور از ایستگاه شماره ۱۶، ایستگاه شماره ۴ در دور دوم است.

همان گونه که در قسمت های پیشین ذکر شد، یکی از قیود حاکم بر سیستم، قید روی قانون کنترلی است، که حد بالای سیگنال کنترلی ۳۰+ و حد پایین آن ۳۰- در نظر گرفته شده است. به این معنا که زمان سفر نامی نمی تواند بیشتر از ۳۰ ثانیه کاهش یا افزایش پیدا کند. همچنین در این شبیه سازی قید رابطه (۲۱) نیز در نظر گرفته شده است که با توجه به جدول شماره ۳ حد بالای آن قابل محاسبه است.

جدول ۳- پارامترهای شبیه سازی بخش ۶-۲

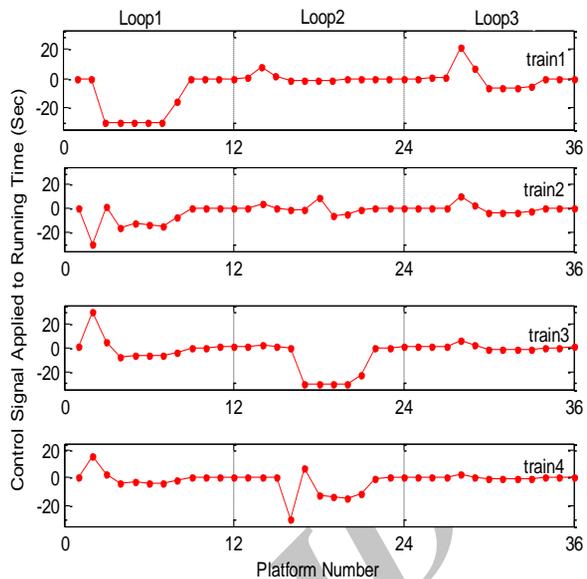
N	۱۲
M	۴
C_{k+1}	۰.۰۳
p,q	۱۰۰
P_y	۶
P_u	۳
H_{min}	۱۸۰ ثانیه
t_B	۶۰ ثانیه
$H = H_{min} + t_B$	۲۴۰ ثانیه
$w_{\frac{1}{2}}$	۱۵۰ ثانیه
$w_{\frac{3}{16}}$	۱۳۰ ثانیه

با استفاده از الگوریتم کنترل پیش بین غیرخطی ارائه شده در (۲۳)، انحراف از زمان اعزام قطارها در شکل ۴ نمایش داده می شود. همان گونه که در این شکل دیده می شود اغتشاش اعمالی به قطار اول در ایستگاه دوم کمی بیشتر از ۱۵۰ ثانیه است که دلیل این امر وجود ضریب C_{k+1} در عدد اغتشاش است. این تأخیر با توجه به زمان حائل به قطارهای بعدی منتقل می شود (اگر کمتر از زمان حائل باشد منتقل نخواهد شد) و با توجه به عدم انتقال تأخیر و سرفاصله زمانی کم و عدم وجود قطار در ایستگاه و حجم کم مسافران توقف کمتری در ایستگاه رخ می دهد و قطار از برنامه خود جلوتر حرکت می کند و همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، سیستم سیگنال کنترلی مثبت جهت جبران تولید می کند. با توجه به شکل ۴ دیده می شود که قطار اول و دوم در دور دوم مجدداً دچار تأخیر می شوند که علت آن قرار گرفتن قطارهای ۳ و ۴ در جلوی قطارهای اول و دوم در زمانی است که دو قطار اول و دوم وارد دور دوم شده اند. به همین ترتیب زمانی که اغتشاش دوم صورت می گیرد پدیده های گفته شده برقرار خواهد بود. همچنین بروز تأخیر در دور سوم در قطار اول به خاطر وجود قطار چهارم جلوی قطار اول و بروز تأخیر در قطار چهارم، انتقال آن به قطار اول و انتشار تأخیر به قطارهای بعدی می باشد.

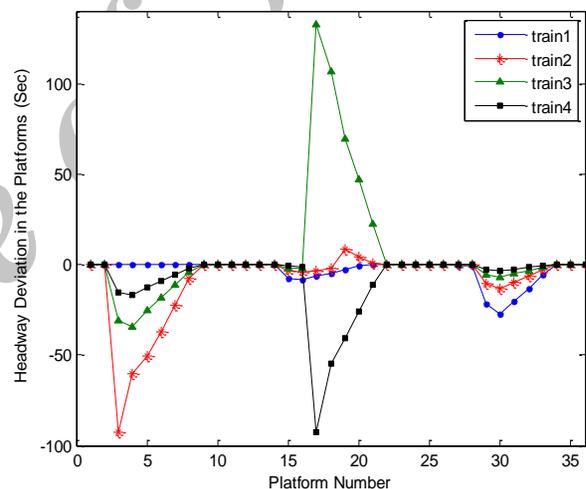
پاسخ مدل ارائه‌شده در این مقاله در مقایسه با مدل‌های ارائه‌شده تحقیقات پیشین که نتیجه آن نشانگر موفقیت مدل‌سازی پیشنهادی در این مقاله می‌باشد. البته قابل‌ذکر است که مدل پیشنهادی در این مقاله شامل نقاط ضعفی هم می‌باشد که از جمله آن می‌توان به نامعینی موجود در پارامتر C_{k+1} با توجه به متغیر بودن مدت زمان توقف قطارها در ایستگاه‌های مختلف اشاره کرد که لازم است در تحقیقات بعدی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در بخش دوم شبیه‌سازی‌ها نیز نقش موفق کنترل کننده پیش‌بین غیرخطی در تنظیم ترافیک نشان داده شده است.

۸- منابع

- 1- Campion, G., Van Breusegem, V., Pinson, P., & Bastin, G. (1985). "Traffic regulation of an underground railway transportation system by state feedback". *Optimal control applications and methods*, 6(4), 385-402.
- 2- Van Breusegem, V., Campion, G., & Bastin, G. (1991). "Traffic modeling and state feedback control for metro lines". *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 36(7), 770-784.
- 3- Paquel, Constance. "Metro Traffic Regulation and Quality of Passenger Service." PhD diss., TU Delft, Delft University of Technology, 2011.
- 4- Narayanaswami, S., & Rangaraj, N. (2011). "Scheduling and rescheduling of railway operations: a review and expository analysis", *Technology Operation Management*, 2(2), 102-122.
- 5- Lin, W. S., & Sheu, J. W. (2011). "Metro traffic regulation by adaptive optimal control", *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(4), 1064-1073.
- 6- Sheu, J. W., & Lin, W. S. (2012). "Adaptive optimal control for designing automatic train regulation for metro line". *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 20(5), 1319-1327.
- 7- Goodman, C. J., & Murata, S. (2001). "Metro traffic regulation from the passenger perspective". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 215(2), 137-147.
- 8- Kecman, P., Corman, F., D'Ariano, A., & Goverde, R. M. (2013). "Rescheduling models for railway traffic management in large-scale networks". *Public Transport*, 5(1-2), 95-123.
- 9- Hassanabadi, H., Moaveni, B., & Karimi, M. (2013). "A comprehensive distributed architecture for railway traffic control using multi-agent systems". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 0954409713503458.



شکل ۵: سیگنال کنترل اعمالی به سیستم ناشی از کنترل کننده پیش‌بین



شکل ۶: انحراف از سرفاصله زمانی نامی در هر ایستگاه

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل گسسته پیشامد غیرخطی برای زمان اعزام قطارها در خطوط مترو با شکل رفت و برگشتی ارائه گردید. نکته مهم در این مدل‌سازی نسبت به مدل‌های ارائه‌شده در تحقیقات پیشین، لحاظ نمودن پدیده انتقال ضربه‌ای تأخیر در مدل بوده است. با توجه به غیرخطی بودن دینامیک ارائه‌شده و ناپایداری سیستم ترافیکی، از کنترل کننده پیش‌بین غیرخطی استفاده شده است. هدف طراحی این کنترل کننده تنظیم ترافیک از طریق بازیابی تأخیر و همچنین یکنواخت نگه‌داشتن سرفاصله زمانی مابین قطارها به منظور کسب رضایت مسافران بوده است. در طراحی کنترل کننده، قیود عملکردی بر روی سیگنال کنترل و انحراف از سرفاصله زمانی در نظر گرفته شده است و کنترل کننده پیش‌بین غیرخطی مطلوب لازم است در این قیود صدق نماید. شبیه‌سازی‌ها در دو بخش انجام پذیرفت، بخش اول مقایسه

- 17- Van den Boom, T.J. and De Schutter, B. (2006). "Modelling and control of discrete event systems using switching max-plus-linear systems". *Control engineering practice*, 14(10), 1199-1211.
- 18- Huang, Sunan, & Tong Heng Lee. *Applied predictive control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- 19- Camacho, Eduardo F., and Carlos Bordons Alba. *Model predictive control*. Springer Science Business Media, 2013.
- 20- Grüne Lars, and Jürgen Pannek. *Nonlinear model predictive control*. Springer London, 2011.
- 21- Henson, M. A. (1998). "Nonlinear model predictive control: current status and future directions" *Computers & Chemical Engineering*, 23(2), 187-202.
- 22- Gill, P. E., Murray, W., & Saunders, M. A. (2002). "SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization". *SIAM journal on optimization*, 12(4), 979-1006.
- 23- Nocedal, Jorge, & Stephen Wright. *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- 10- Fernandez, A. P. C. A., Cucala, A. P., Vitoriano, B., & De Cuadra, F. (2006). "Predictive traffic regulation for metro loop lines based on quadratic programming". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(2), 79-89.
- 11- Assis, W. O., & Milani, B. E. (2004). "Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control", *Automatica*, 40(8), 1397-1404.
- 12- De Schutter, B., & Van Den Boom, T. (2001). "Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems". *Automatica*, 37(7), 1049-1056.
- ۱۳- معاونی ب، کریمی م، (۱۳۹۴)، "بازیابی به‌هنگام جدول زمان‌بندی یک شبکه مترو با استفاده از کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین و در حضور قیود واقعی"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، (تحت چاپ).
- ۱۴- یقینی مسعود، لسان جواد، برنامه ریزی عملیات حمل و نقل ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.
- 15- Hansen Ingo A , Pachtl Jörn, *Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation*. Eurailpress, 2008.
- 16- Hansen, I. A. (2009). "Railway network timetabling and dynamic traffic management". *In 2nd International Conference on Recent Advances in Railway Engineering, ICRARE-2009, Tehran, IR Iran, Sept. 27-28.*

Archive