Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Modeling of Moving Block Signaling System Using Fuzzy Petri Net

Milad Taherian[a], Abbas Dideban[b*]

[a] PhD Candidate in Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
[b] Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-03
Revised: 2024-01-03
Accepted: 2024-01-16

Keywords:

Rail transportation systems,
Railway signaling system,
Moving block,
Fixed block,
Fuzzy Petri net.

ABSTRACT

The signaling system, as one of the main components of the railway network, has a decisive role in capacity of the lines and headway of the trains as two major indicators in evaluating the performance and safety of the railway networks. Dynamic safety distance in the moving block signaling system and its adjustment based on the position and speed of trains is a suitable approach to optimally use the capacity of railway network lines and reduce the headway of trains. In this article, using fuzzy Petri net, a model of block in the railway signaling system and simultaneous dispatch of several trains in a fixed block has been presented. In fact, by using the fuzzy Petri net, a moving block structure is considered next to the existing fixed block. For this purpose, a decision is made by defining control variables and fuzzy membership functions for them and defining fuzzy rules, taking into account the safety requirements regarding the permission or lack of permission for the follower train to enter a block. The main innovation of this method is to provide the possibility of benefiting from benefits of the moving block system without the need to change the previous system and as a result increase the reliability compared to the moving block. From the results of this method, we can mention the increase of network capacity and reduction of headway train.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32515.1659

*** Corresponding author.**
E-mail address: adideban@semnan.ac.ir

How to cite this article: Taherian, M., & dideban, A. (2023). Modeling of moving block signaling system using fuzzy Petri net. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *9*(4), 105-126.
doi: 10.22075/jtie.2024.32515.1659

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

Semnan University

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی

میلاد طاهریان[۱]، عباس دیدبان[۲*]

[۱]دانشجوی دکتری مهندسی کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[۲*]دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

واژگان کلیدی:

سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی،

سیستم سیگنالینگ ریلی،

بلاک متحرک،

بلاک ثابت،

شبکه پتری فازی.

چکیده

سیستم سیگنالینگ به عنوان یکی از اجزای اصلی شبکه ریلی، نقشی تعیین‌کننده در ظرفیت خطوط و سر فاصله زمانی اعزام قطارها به عنوان دو شاخص عمده در بررسی عملکرد و ایمنی شبکه‌های ریلی دارد. فاصله ایمنی دینامیک در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک و تنظیم آن بر اساس موقعیت و سرعت قطارها رویکردی مناسب جهت استفاده بهینه از ظرفیت خطوط شبکه ریلی و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها می‌باشد. در این مقاله، با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی، به ارائه مدلی از بلاک‌بندی در سیستم سیگنالینگ ریلی و اعزام همزمان چند قطار در یک بلاک ثابت پرداخته شده است. در واقع، با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی، به نوعی ساختار بلاک متحرک در کنار بلاک ثابت موجود در نظر گرفته می‌شود. به این منظور، با تعریف متغیرهای کنترلی و توابع عضویت فازی برای آنها و ایجاد پایگاه قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی در خصوص مجوز و یا عدم مجوز ورود قطار پیرو به یک بلاک تصمیم‌گیری می‌شود. نوآوری اصلی این روش، فراهم نمودن امکان بهره‌مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان نسبت به بلاک متحرک می‌باشد. از نتایج این روش می‌توان به افزایش ظرفیت شبکه و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها اشاره نمود.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32515.1659

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: adideban@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: طاهریان, میلاد, & دیدبان, عباس. (۱۴۰۲). مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک با بهره گیری از شبکه پتری فازی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل,, ۹(۴), ۱۲۶-۱۰۵. doi: 10.22075/jtie.2024.32515.1659

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱. مقدمه

شبکه‌های ریلی، بخش مهمی از سیستم‌های حمل‌ونقل دنیا هستند که به دلیل قابلیت اطمینان و ایمنی زیاد دارای مزیت رقابتی ویژه‌ای نسبت به سایر روش‌های حمل‌ونقل می‌باشند. دو شاخص عمده در بررسی عملکرد، کارایی و ایمنی شبکه‌های ریلی، ظرفیت خطوط و سر فاصله زمانی اعزام قطارها[1] می‌باشند، که به طور مستقیم در ارتباط با سرعت و زمان سیر قطارها و میزان جابجایی بار و مسافر می‌باشند. سیستم سیگنالینگ به عنوان یکی از اجزای اصلی شبکه ریلی که وظیفه برقراری ارتباط دائم و پیوسته با قطار، کنترل ایمن ترافیک و جلوگیری از برخورد قطارها با اعمال فرامین مناسب در هر شرایطی را بر عهده دارد، تعیین‌کننده این دو پارامتر می‌باشد. امروزه افزایش تقاضا جهت استفاده بهینه از ظرفیت خطوط شبکه ریلی، کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها و همزمان افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان سبب به کارگیری راهکارهای نوین در مکانیزه کردن سیستم سیگنالینگ ریلی شده است.

سیستم سیگنالینگ ریلی دارای بخش‌های مختلف بوده که شامل مدهای عملکردی با دینامیک رویدادمحور می‌باشد. از این رو می‌توان آن را به عنوان یک سیستم گسسته پیشامد[2] در نظر گرفت و از اتوماتا[3] و شبکه‌های پتری[4] به عنوان ابزارهایی به منظور مدل‌سازی آن بهره‌گیری نمود. کاربرد شبکه‌های پتری در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی به دلیل قابلیت نمایش گرافیکی و ساختار خوش‌تعریف آن، رشد چشمگیری داشته و تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام گرفته است.

از جمله تحقیقات صورت گرفته می‌توان به کاربرد این شبکه‌ها در زمان‌بندی و محاسبه تأخیر قطارها اشاره نمود. با توجه به محدودیت بلاک‌ها و عدم امکان اشغال آن‌ها با بیش از یک قطار در هر لحظه، سر فاصله زمانی اعزام قطارها و زمان‌بندی حرکت آنها نقش مهمی را در رفع تداخل و کاهش زمان سفر بر عهده دارد، که در نهایت منجر به افزایش ظرفیت و میزان رضایت‌مندی مسافرین و کاهش مصرف انرژی می‌گردد (وندر آلست و اُجیک، ۱۹۹۵). از آنجا که با توجه به محدودیت‌های فنی، از جمله زیرساخت و همچنین الزامات ایمنی و ترافیکی، نمی‌توان سرعت قطارها را به منظور کاهش زمان سفر بی‌رویه افزایش داد، یالچینکایا و بایهان (۲۰۰۹) در مطالعه خود به بهینه‌سازی زمان سفر با تنظیم و بهینه نمودن سر فاصله زمانی اعزام قطارها به کمک شبکه پتری پرداخته‌اند. بورکولتر (۲۰۰۵) برای نخستین بار از شبکه پتری رنگی جهت رسم گراف به منظور برنامه‌ریزی حرکت قطارها استفاده نمود. مارکوویچ و همکاران (۲۰۱۵) نیز شبکه پتری را در تحلیل رابطه بین تأخیر ورود قطار و ویژگی‌های مختلف سیستم ریلی و مقایسه آن با روش‌های یادگیری ماشین و شبکه عصبی توسعه دادند. فای (۲۰۰۰) با ترکیب منطق فازی و قدرت گرافیکی از شبکه پتری به منظور مدل‌سازی سیستم پشتیبانی اعزام شبکه ریلی جهت کنترل ترافیک راه‌آهن استفاده نمود. در ادامه، چنگ و یانگ (۲۰۰۹) از شبکه پتری فازی در جهت ایجاد قوانین تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی و میلینکوویچ و همکاران (۲۰۱۳) در جهت تخمین دقیق تأخیر اولیه قطارها بهره بردند. یکی از چالش‌های عمده سیستم ریلی پیش‌بینی زمان ورود قطار به ایستگاه‌های میانی یا ایستگاه نهایی است، که در مطالعه دایان و همکاران (۲۰۱٤) به حل این مشکل با استفاده از شبکه پتری زمان‌دار تأخیری جهت مدل‌سازی رفتار اجزا سیستم پرداخته شده است. ونکاتارانگان و یان (۲۰۱٤) نیز مدلی جهت ترافیک سیستم ریلی که شامل ورود و خروج قطار در ایستگاه‌های مختلف، ازدحام افراد در

[1]- Headway
[2]- Discrete event system
[3]- Automata
[4]- Petri nets

ایستگاه‌ها، سوارشدن به قطار و پیاده شدن از قطار می‌باشد را ارائه نموده‌اند.

از دیگر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به کاربرد شبکه‌های پتری در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی از جمله مدل‌سازی یک تقاطع ریلی، یک ایستگاه راه‌آهن یا شبکه ریلی اشاره نمود. دورموش و سویلمز (a ۲۰۰۹) در مطالعه خود به مدل‌سازی یک تقاطع ریلی شامل یک سوزن و چهار چراغ سیگنال پرداختند و در ادامه تحقیقات خود را به مدل‌سازی یک تقاطع ریلی شامل دو سوزن و شش چراغ سیگنال توسعه دادند (b ۲۰۰۹). زارنای (۲۰۰٤) در مطالعه‌ای به کمک شبکه پتری به مدل‌سازی یک ایستگاه راه‌آهن که شامل ادوات ریلی و تصمیم‌گیری جهت کنترل ایمن ترافیک ایستگاه می‌باشد، پرداخته است.

در مطالعات بررسی شده در مرور ادبیات موضوع، از انواع شبکه‌های پتری به منظور مدل‌سازی در شبکه ریلی بهره‌گیری شده است. به عنوان نمونه، بیورک و همکاران (۲۰۰٦) و جیا و ساتزو (۲۰۰۸) از شبکه پتری معمولی جهت مدل‌سازی استفاده نموده‌اند، در حالی که در مطالعات وو و اشنایدر (۲۰۱٦ و ۲۰۱۸) و بارتکویسیوس و همکاران (۲۰۰۵) از شبکه پتری رنگی به منظور مدل‌سازی شبکه ریلی استفاده شده است. جیا و ساتزو (۲۰۰۲) در ادامه تحقیقات خود نیز از شبکه‌های پتری سطح بالا جهت توسعه مدل شبکه ریلی خود بهره برده‌اند. بانیک و داسگوپتا (۲۰۱۱) و یانیک و قوش (۲۰۱۳) در مطالعات خود، پس از مدل‌سازی اجزای سیستم، از نامعادلات محدودکننده تئوری کنترل نظارتی و اعمال محدودیت‌هایی بر شبکه جهت جلوگیری از برخورد بهره برده‌اند.

علاوه بر مطالعات در حوزه زمان‌بندی و حرکت قطارها، تحقیقاتی نیز در خصوص کاربرد شبکه‌های پتری در زمینه افزایش ایمنی نقاط حادثه‌خیز ریلی انجام گرفته است. به عنوان نمونه، ژِنگ (۲۰۰۹) با استفاده از شبکه پتری احتمالی، به آنالیز خطا در سیستم حفاظت و ایمنی راه‌آهن پرداخته است. یکی از عوامل وقوع حوادث ریلی، شکستگی خطوط و یا کاهش پارامترهای کیفی خطوط است که منجر به خروج قطار از ریل می‌گردد. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه پاترا و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود که به کمک مدل پتری و شبیه‌سازی مونت کارلو، ارزیابی دقیقی از ایمنی قطار با احتمال خروج قطار از خط ناشی از شکستگی ریل انجام داده‌اند.

از دیگر عوامل وقوع حادثه، تقاطع‌های همسطح می‌باشند که جهت کنترل ایمن ناحیه خطر در این تقاطع‌ها باید از ورود همزمان قطار و ترافیک جاده جلوگیری گردد. به عنوان نمونه، مطالعات سیتی و همکاران (۲۰۰۹) و همچنین دوتیلیول و همکاران (۲۰۰٦) به ارزیابی خطر در یک تقاطع هم‌سطح جاده و خط ریل راه‌آهن به کمک شبکه پتری پرداخته‌اند. ونگ و همکاران (۲۰۱۵) نیز از شبکه پتری زمان‌دار جهت کنترل تقاطع یک جاده با دو خط ریل موازی بهره برده و حالات خطرساز را با استفاده از گراف قابل دسترس شناسایی و با استفاده از رنگ چراغ علائم، از وقوع آن‌ها جلوگیری نموده‌اند. احمد و خان (۲۰۱۳) در مطالعه خود، به افزایش ایمنی قطار و جلوگیری از برخورد دو قطار در ناحیه تقاطع بین دو ریل پرداخته‌اند. به این منظور، پس از مدل‌سازی تقاطع توسط شبکه پتری، با استفاده از تئوری کنترل نظارتی، از قرار گرفتن قطار در حالت‌های ممنوع جلوگیری می‌کند. در ادامه این تحقیقات، خان و همکاران (۲۰۱٤) به بهره‌گیری از شبکه پتری و ارائه مدلی از سوزن و تقاطع همسطح در سیستم بلاک متحرک و ارزیابی مدل با استفاده از درخت دسترس‌پذیری جهت افزایش ایمنی پرداخته‌اند.

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های پتری دارای عناصر کم، ولی کارآمد می‌باشند و برای مدل کردن سیستم‌هایی که به طور دقیق توصیف می‌شوند کاربرد داشته و در برابر تغییرات کوچک سیستم مقاوم هستند؛ ولی قابلیت حل مسائل

نامعلوم را نداشته و در مواجهه با داده‌های دارای عدم قطعیت و مبهم نامناسب هستند. از آنجا که داده‌های مبهم با منطق فازی قابل نمایش هستند، از این رو، بهره‌گیری از شبکه‌های پتری فازی که ترکیب این شبکه‌ها با تئوری منطق فازی می‌باشد، مفید به نظر می‌رسد. در واقع، شبکه پتری فازی که به نوعی تلفیق یک روش کلاسیک و یک روش هوشمند می‌باشد، جهت افزایش قدرت مدل‌سازی شبکه‌های پتری به کار گرفته می‌شود. از آنجایی که تا کنون در تحقیقات گذشته از شبکه‌های پتری فازی در زمینه کنترل سیستم سیگنالیگ ریلی و بهبود ظرفیت خطوط استفاده نشده و با توجه به مزایای شبکه پتری فازی، این مقاله با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی و تعریف قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی به مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ ریلی مبتنی بر ساختار بلاک متحرک در کنار سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت موجود پرداخته است. این رویکرد، ضمن افزایش ظرفیت شبکه، کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها و افزایش قابلیت اطمینان نسبت به بلاک متحرک، امکان بهره‌مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی را فراهم می‌کند.

در ادامه این مقاله، ابتدا مفاهیم پایه سیستم سیگنالینگ ریلی و انواع آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس شبکه-های پتری فازی و خواصی از این شبکه‌ها که در مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ ریلی مد نظر می‌باشد معرفی شده و در نهایت به مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ پیشنهادی با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی پرداخته و نتایج بهبود حاصل از آن به کمک شبیه‌سازی ارائه می-شود.

۲. مفاهیم اساسی

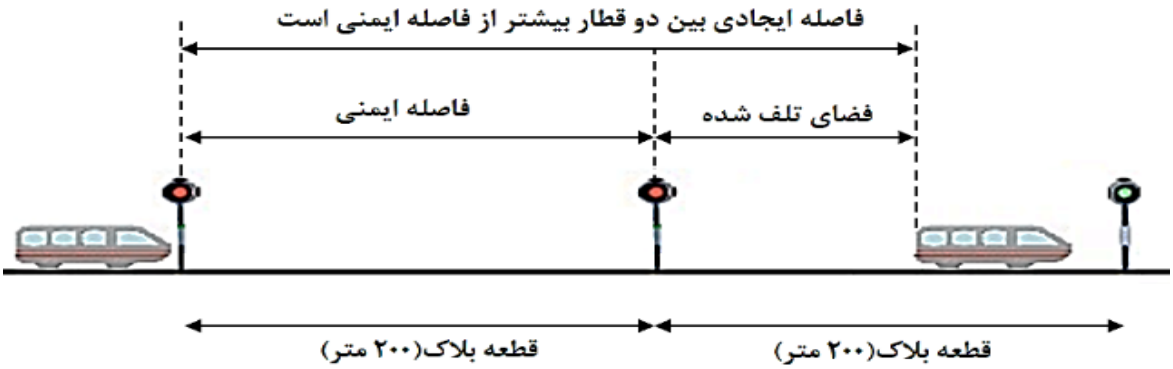
۲-۱. سیستم سیگنالینگ ریلی

یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های راه‌آهن که قابلیت اطمینان، ایمنی و حتی تا حد زیادی سرعت قطارها وابسته به آن می‌باشد سیستم سیگنالینگ ریلی است. سیستم سیگنالینگ شامل دو بخش تشخیص قطار و ارسال فرامین و کنترل حرکت قطارها می‌باشد و وظیفه حفظ فاصله ایمن بین دو قطار و جلوگیری از برخورد آن‌ها را بر عهده دارد. سیستم سیگنالینگ با توجه به درخواست اعزام‌کننده برای اختصاص یک مسیر به قطار، شرایط لازم را بررسی کرده و در صورت مجاز بودن مسیر درخواستی، تمامی المان‌های موجود در مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم و قفل می‌کند و مسیر به قطار اختصاص یافته و از ورود سایر قطارها به مسیر اختصاص داده شده به قطار، جلوگیری می‌کند (تاکاشیجی، ۱۹۹۹). پیاده‌سازی سیستم سیگنالینگ ریلی به دو روش بلاک ثابت و بلاک متحرک صورت می‌گیرد.

۲-۱-۱. سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت

سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت، سیستم معمول و رایج اکثر راه‌آهن‌ها در سراسر دنیا می‌باشد که بر اساس تجهیزات کنار خط طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم، به منظور تنظیم فاصله زمانی اعزام قطارها و امکان سیر همزمان چند قطار با حفظ فاصله ایمن در مسیر بین دو ایستگاه، طول مسیر به قسمت‌های کوچکتری به نام بلاک تقسیم‌بندی می‌شود، به نحوی که در هر لحظه امکان حضور بیش از یک قطار در یک بلاک وجود ندارد. ایجاد فاصله ثابت مکانی بین قطارها و ترافیک هر بلاک توسط سیستم سیگنالینگ کنترل می-شود. حداقل طول هر بلاک به حداکثر سرعت قطارها، فاصله ترمز قطارها و تعداد نماهای سیگنال بستگی دارد. از معایب بلاک ثابت می‌توان به توقف‌های غیر ضروری و کاهش سرعت سیر، عدم بهره‌برداری مناسب از مسیر ریلی و هچنین ثابت بودن طول بلاک برای هر قطار با هر سرعتی اشاره نمود که در شرایط ترافیک سنگین قطارها پاسخگو نمی‌باشد.

در شکل ۱، فاصله ایجاد شده بین دو قطار در یک بلاک ثابت نشان داده شده است، که بیشتر از فاصله ایمنی مورد نیاز بوده و بیانگر عدم بهره‌برداری مناسب از ظرفیت خطوط و وجود فواصل زمانی و مکانی تلف شده در سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت می‌باشد.

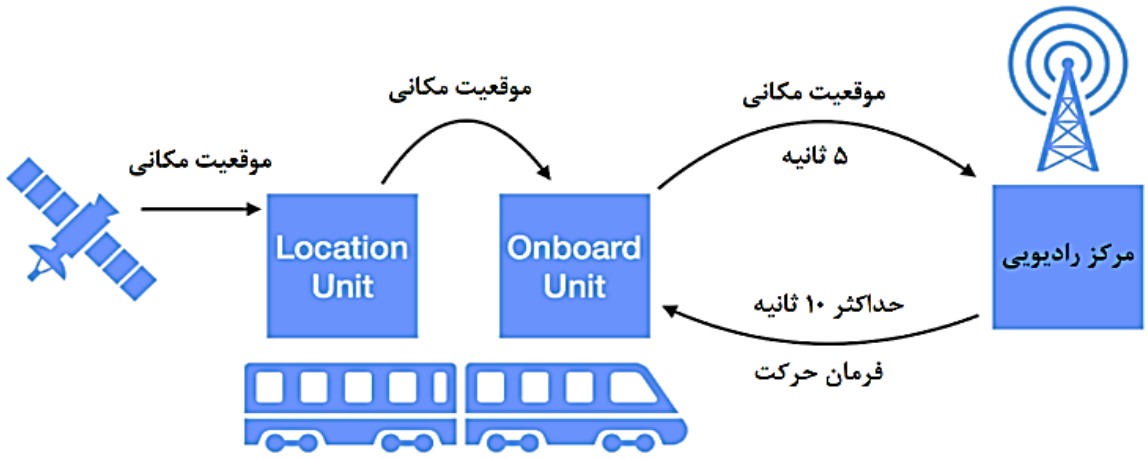


شکل ۱. وجود فضای تلف شده در سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت

۲-۲-۲. سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک

در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک، فاصله ایمنی مانند بلاک ثابت استاتیک نبوده، بلکه یک فاصله دینامیک قابل تنظیم بر اساس حفظ فاصله ایمن از قطار پیشرو و متناسب با سرعت لحظه‌ای قطارها می‌باشد. در سیستم بلاک متحرک، با وجود افزایش ظرفیت شبکه و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها، پارامتر قابلیت اطمینان نسبت به سیستم بلاک ثابت کاهش می‌یابد. ضمن این که تغییر سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت موجود به بلاک متحرک فرایندی پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد.

در سیستم بلاک متحرک، سرعت و موقعیت مکانی قطار به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و از طریق سیستم رادیویی به مرکز کنترل جهت اعمال فرامین مناسب ارسال می‌گردد. در شکل ۲، نحوه ارتباط اجزا در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک نمایش داده شده است.



شکل ۲. نحوه ارتباط بین اجزا در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک

تنظیم فاصله دینامیک در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک بر طبق استاندارد اروپایی سیستم مدیریت ترافیک ریلی[1](ERTMS) و سیستم کنترل قطار[2](ETCS) که کنترل اطلاعات بر پایه انتقال بی‌سیم را فراهم می‌کند، در سه سطح تعیین می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.

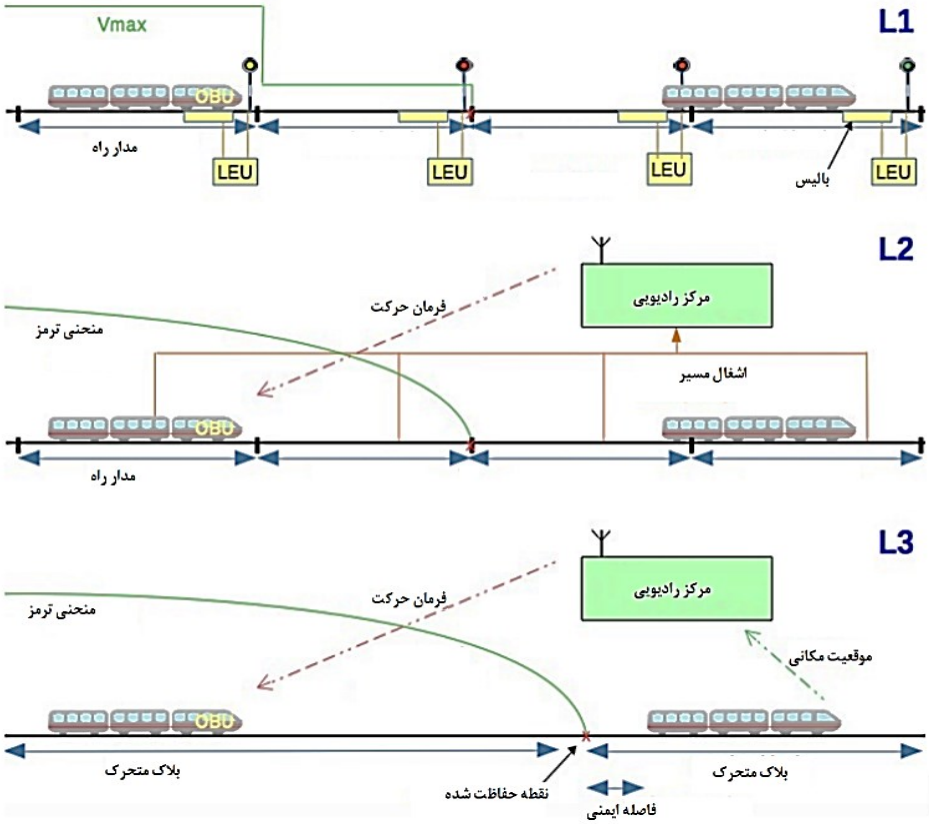
در سطح اول، سیگنال علائم از طریق واحدهای الکترونیکی کنار خط[3](LEU) به بالیس‌های[4] نصب شده روی تراورس‌ها[5] متصل می‌شود. بالیس‌ها علاوه بر انتقال اطلاعات مربوط به مکان فعلی قطار، اطلاعات مربوط به وضعیت سیگنال را نیز به سیستم‌های موجود در قطار منتقل می‌کنند. در این حالت، مانند قبل، سیگنال کنار خط وجود داشته و لکوموتیوران باید با توجه به آن توقف نموده یا به حرکت ادامه دهد. قطارها با استفاده از بالیس-ها مکان‌یابی شده و انتقال اطلاعات بی‌سیم و با استفاده از سیستم رادیویی می‌باشد. در این سطح وجود بلاک، مرکز رادیویی[6](RBC) که در کنار خط و در مسیرهایی به طول ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر نصب می‌گردد، توجیهی بابت استفاده از سطح یک باقی نگذاشته و دیگر نیازی به وجود سیگنال در کنار خط نمی‌باشد. در این حالت، فاصله ترمز یک مقدار ثابت نمی‌باشد، بلکه کمیتی است که با توجه به دینامیک بودن، بسته به شرایط می‌تواند متغیر باشد. در سطح سوم در مقایسه با سطح دوم، هیچ-گونه سیستم نمایانگر یا سیگنال برای نشان دادن آزاد بودن یا اشغال بودن بلاک جلویی وجود ندارد. در این حالت، سر فاصله زمانی اعزام قطارها را می‌توان یا از طریق شبکه ثابت بلاک‌ها و یا با استفاده از فاصله قطار با انتهای قطار جلویی تعیین نمود.

۲-۲. محاسبه ظرفیت خط

ظرفیت یک مسیر، در اصل توانایی آن در عبور تعداد مشخصی از وسایل حمل‌ونقل در این مسیر می‌باشد. محاسبه ظرفیت خطوط ریلی، پیچیده‌تر از محاسبه ظرفیت سایر شیوه‌های حمل‌ونقلی است. خصوصیات زیرساختی، مشخصات ناوگان و نحوه زمان‌بندی حرکت قطارها، عواملی هستند که در تعیین ظرفیت محورهای ریلی تأثیر می‌گذارند. متداول‌ترین روش محاسبه ظرفیت ریلی، رابطه اسکات[7] (۱) می‌باشد که در این روش، ظرفیت بلاک بر اساس زمان سیر کندترین قطار در بلاک در نظر گرفته می‌شود.

$$C = \frac{1440 - W}{T + t} * K \qquad (۱)$$

[1]- European Rail Traffic Management System
[2]- European Train Control System
[3]- Line side Electronic Unit
[4]- Balise
[5]- Traverse
[6]- Radio Block Center
[7]- Scott



شکل ۳. تنظیم فاصله دینامیک در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک

که در آن:

C: ظرفیت بر اساس زوج قطار مختلط (باری و مسافری) در شبانه‌روز

W: زمان مسدودی (دقیقه) برای تعمیر و نگهداری

T: زمان سیر کندترین قطار باری در بلاک (دقیقه)

t: سرفاصله ایمنی بین قطارهای هم‌جهت و قطارهای جهت مخالف

K: ضریب کارایی بر اساس زمان توقف‌های برنامه‌ریزی شده و اجباری، نرخ تأخیرات پیش‌بینی نشده، وجود تقاطع و حق اولویت، تأخیر و حرکت از خارج از برنامه قطارها و ... اعمال شده و معمولاً برابر ۷۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳. شبکه‌های پتری فازی

ایده شبکه‌های پتری برای نخستین بار توسط کارل آدام پتری در سال ۱۹۶۲ در رساله دکتری وی معرفی گردید (پتری، ۱۹۶۲). شبکه پتری یک روش مدل‌سازی دینامیک است که قابلیت نمایش گرافیکی سیستم به همراه توصیف ریاضی آن را دارد و به صورت همزمان حالت و عملکرد یک سیستم را نشان می‌دهد. امروزه، کاربرد این شبکه به دلیل سادگی و ساختار خوش تعریف آن، در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های گسسته پیشامد از قبیل سیستم‌های ارتباطی، تولیدی و حمل‌ونقل رشد چشمگیری داشته است.

شبکه‌های پتری دارای عناصر کم ولی کارآمد می باشند و در برابر تغییرات کوچک سیستم مقاوم هستند. یکی دیگر از خصوصیات مهم شبکه پتری قابل اجرا بودن آن است که از همین خاصیت می‌توان برای ارزیابی رفتار و کارایی یک سیستم بهره جست. پس از مدل‌سازی سیستم با شبکه پتری، باید به تجزیه و تحلیل مدل پرداخت و برخورد با هر گونه خطا در مدل و شبیه‌سازی به منزله نقص در طراحی مدل می‌باشد. جهت رفع نقص،

باید طرح را بازبینی و اصلاح کرد و مرحله تجزیه و تحلیل مدل را تکرار نمود تا تمام مشکلات موجود مرتفع گردد. این فرایند برای سیستم‌های در حال بهره‌برداری و زیر بار نیز به‌کار می‌رود. یک شبکه پتری با یک پنج‌تایی مرتب به صورت $(P.T.I.O.M_o)$ نمایش داده می‌شود که در آن:

- $P = \{P_1. \dots . P_n\}$: مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از مکان‌ها است.
- $T = \{T_1. \dots . T_n\}$: مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از گذرگاه‌ها است.
- I : مجموعه‌ای از کمان‌ها که از مکان‌ها به گذرگاه‌ها متصل است (کمان‌های ورودی).
- O : مجموعه‌ای از کمان‌ها که از گذرگاه‌ها به مکان‌ها متصل است (کمان‌های خروجی).
- M_o : تعداد اولیه نشانه‌ها (تابع علامت‌گذاری اولیه)

شبکه‌های پتری برای مدل کردن سیستم‌هایی که به طور دقیق توصیف می‌شوند کاربرد دارند و در مواجهه با داده‌های دارای عدم قطعیت نامناسب می‌باشند. از آنجا که داده‌های مبهم با منطق فازی قابل نمایش هستند، ادغام تئوری منطق فازی با شبکه‌های پتری، جهت افزایش قدرت مدل‌سازی شبکه‌های پتری، مفید به نظر می‌رسد (سوراج، ۲۰۱۲). شبکه‌های پتری فازی توسط لونی به عنوان یک مدل توسعه‌یافته از شبکه‌های پتری در سال ۱۹۸۸ معرفی شده است (ژو و زین، ۲۰۱۶).

یک شبکه پتری فازی با یک هشت‌تایی مرتب به صورت $(P.T.D.I.O.f.\alpha.\beta)$ نمایش داده می‌شود، که در آن:

- $P = \{P_1. \dots . P_n\}$: مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از مکان‌ها است.
- $T = \{T_1. \dots . T_n\}$: مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از گذرگاه‌ها است.
- $D = \{D_1. \dots . D_n\}$: مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از گزاره‌ها است به طوری که: $P \cap T \cap D = \emptyset \,.\, |P| = |D|$
- $I: T \to P^{\infty}$ تابع ورودی (مکان‌های ورودی به گذرگاه)
- $O: T \to P^{\infty}$ تابع خروجی (مکان‌های خروجی از گذرگاه)
- $f: T \to [0.1]$ تابعی که هر گذرگاه را به یک عدد حقیقی بین صفر و یک نسبت می‌دهد (درجه عضویت هر گذرگاه)
- $\alpha: P \to [0.1]$ تابعی که هر مکان را به یک عدد حقیقی بین صفر و یک نسبت می دهد (درجه عضویت هر مکان)
- $\beta: P \to D$ تابعی که هر مکان را به یک گزاره نسبت می‌دهد.

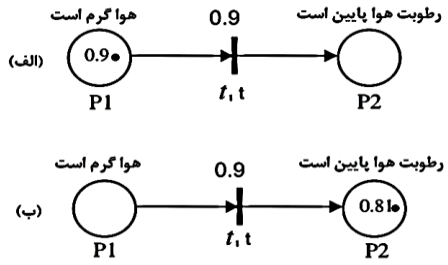
در شکل ٤، نمونه‌ای از یک شبکه پتری فازی نمایش داده شده که روابط حاکم بر آن به صورت زیر است:

$$P = \{p_1.p_2\} \;.\; T = \{t_1\} \;.I(t_1) = \{p_1\} \;.O(t_1) = \{p_2\}$$

$$D = \{\text{رطوبت هوا کم است ، هوا گرم است}\}$$

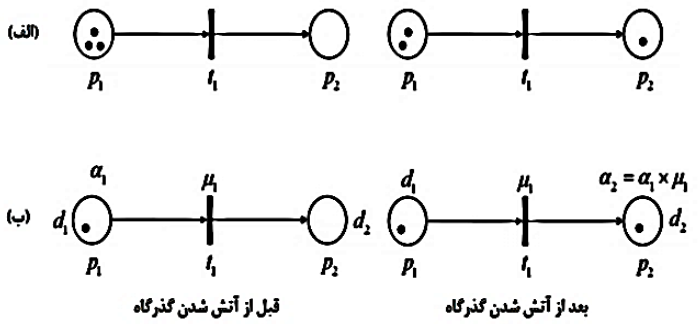
$$\beta(p_1) = \{\text{هوا گرم است}\} \;.\beta(p_2) = \{\text{رطوبت هوا کم است}\}$$

$$F(t_1) = 0.9 \;.\alpha(p_1) = 0.9 \,.\; \alpha(p_2) = 0$$



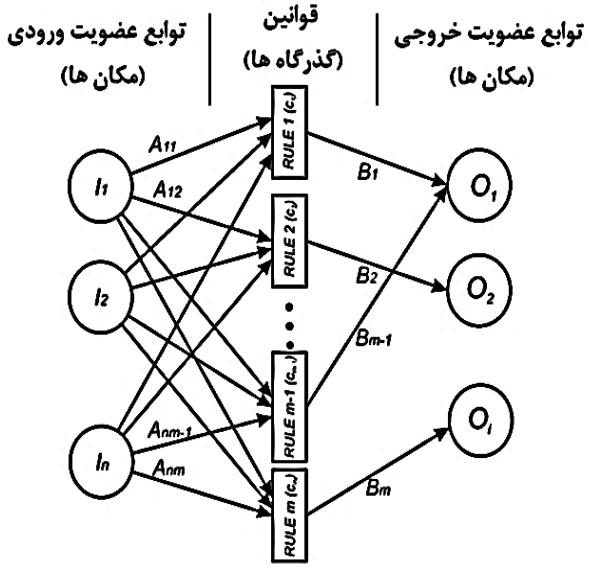
شکل ٤. الف) قبل از آتش شدن و ب) بعد از آتش شدن گذرگاه

در شبکه‌های پتری فازی، به هر مکان یک گزاره با درجه عضویت بین صفر و یک نسبت داده می‌شود و بر خلاف شبکه پتری معمولی تعداد نشانه یک مکان نمی‌تواند از یک بیشتر باشد. همچنین، با هر بار آتش شدن یک گذرگاه نشانه یک مکان از بین نمی‌رود. درجه قطعیت[1](CF) هر قانون فازی نیز بستگی به درجه عضویت گذرگاه مرتبط با آن مکان دارد. در شکل ۵، مقایسه بین شبکه پتری معمولی و شبکه پتری فازی در حالت قبل و بعد از آتش شدن گذرگاه نمایش داده شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۵. الف) شبکه پتری معمولی و ب) شبکه پتری فازی

به منظور مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های پتری فازی و نمایش وابستگی منطقی بین متغیرهای کنترلی از مفاهیم بنیادی و مجموعه‌ای از قوانین فازی "اگر-آنگاه[2]" استفاده می‌شود. پایگاه قوانین[3] به نوعی قلب یک سیستم فازی محسوب شده و سایر اجزای سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قوانین به شکل مؤثر استفاده می‌شوند. در شکل ٦، شماتیک کلی شبکه‌های پتری فازی نمایش داده شده است.



شکل ٦. نمایش کلی شبکه پتری فازی

[1]- Certainty Factor

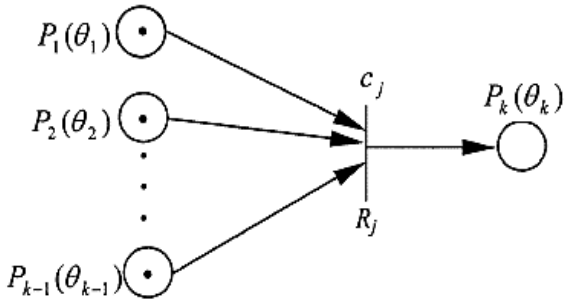
[2]- IF-THEN

[3]- Rule base

نگاشت بین قوانین فازی و شبکه‌های پتری فازی به سه روش صورت می‌گیرد (شکل‌های ۷ تا ۹)، که در آن θ_i بیانگر درجه عضویت گزاره مربوط به مکان P_i در قانون فازی R_j بوده و c_j بیانگر درجه عضویت گذرگاه مرتبط با قانون فازی R_j می‌باشد (گائو و همکاران، ۲۰۰۳).

ساختار اشتراک یا AND:

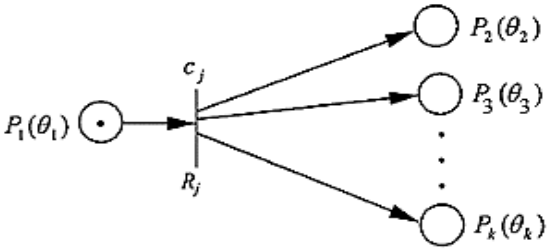
$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \wedge P_2(\theta_2) \wedge \ldots \wedge P_{k-1}(\theta_{k-1}) \rightarrow P_k(\theta_k)$$
$$\theta_k = \min\{\theta_1.\theta_2.\ldots.\theta_{k-1}\} * c_j$$



شکل ۷. نمایش قانون ساختار AND توسط شبکه پتری فازی

ساختار انشعاب:

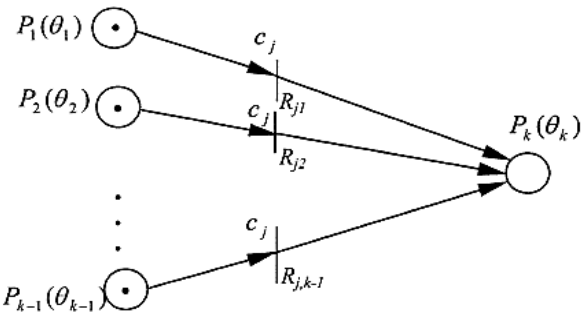
$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \rightarrow P_2(\theta_2) \wedge \ldots \wedge P_{k-1}(\theta_{k-1}) \wedge P_k(\theta_k)$$
$$\theta_2 = \theta_1 * c_j \,.\theta_3 = \theta_1 * c_j.\ldots.\theta_k = \theta_1 * c_j$$



شکل ۸. نمایش قانون ساختار انشعاب توسط شبکه پتری فازی

ساختار اجتماع یا OR:

$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \vee P_2(\theta_2) \vee \ldots \vee P_{k-1}(\theta_{k-1}) \rightarrow \ P_k(\theta_k)$$
$$\theta_k = max\{\theta_1.\theta_2.\ldots.\theta_{k-1}\} * c_j$$



شکل ۹. نمایش قانون ساختار OR توسط شبکه پتری فازی

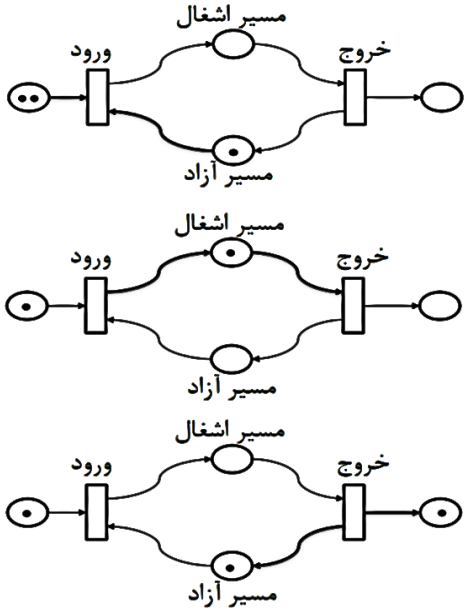
در ادامه مقاله، به ارائه ایده اصلی و بهره‌گیری از شبکه پتری فازی جهت مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک پرداخته شده است.

۳. مدل‌سازی بلاک‌بندی توسط شبکه پتری فازی

به منظور طراحی یک سیستم سیگنالینگ با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم-گیری[1]، باید دستیابی به اطلاعات مورد نظر سیستم در یک زمان منطقی فراهم باشد. همچنین، قابلیت مدل‌سازی سیستم پشتیبان به یک روش وجود داشته و ابزار مناسب جهت شبیه‌سازی این مدل‌سازی به منظور بررسی صحت نتایج در چند ثانیه در دسترس باشد. نتایج به دست آمده نیز باید تا حدی قابل قبول و مورد انتظار باشد. در این مقاله، به کمک شبکه پتری فازی و تعریف قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، به ارائه مدلی از بلاک-بندی در سیستم سیگنالینگ ریلی به عنوان یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری پرداخته شده است.

اگر یک بلاک ثابت با شبکه پتری معمولی مدل‌سازی گردد، در صورت وجود قطار و اشغال بودن بلاک، مکان دارای نشانه و در صورت عدم اشغال فاقد نشانه می‌باشد. در شکل ۱۰، مدل پتری یک بلاک ثابت در حالت آزاد و اشغال نمایش داده شده است.

در نظریه کلاسیک مجموعه‌ها، یک عضو یا به یک مجموعه تعلق دارد یا ندارد. در حالی که در تئوری فازی، دسترسی تدریجی عضویت اعضا در مجموعه مجاز است.



شکل ۱۰. مدل پتری بلاک ثابت

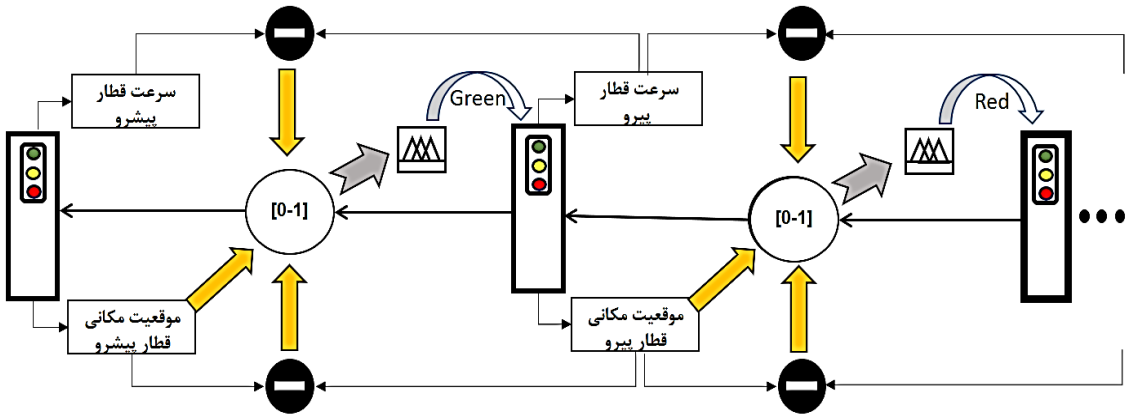
اگر از شبکه پتری فازی جهت مدل‌سازی بلاک ثابت استفاده گردد، در صورت اشغال بلاک توسط قطار، با توجه به متغیرهای کنترلی تعریف شده و توابع عضویت آنها، یک گزاره با درجه عضویت بین صفر و یک به هر متغیر کنترلی نسبت داده می‌شود. به عبارت دیگر، میزان وابستگی قطار به یک بلاک اشغال فازی از طریق ترکیب خروجی فازی متغیرهای کنترلی و با درجه عضویت بین یک و صفر تعیین می‌گردد. در نتیجه، بر خلاف مدل پتری

[1]- Desicion Support System

معمولی که درجه عضویت قطار یک یا صفر بوده و متناسب با آن وضعیت بلاک اشغال یا آزاد می‌باشد، در مدل پتری فازی با توجه به درجه عضویت قطار که بین صفر و یک می‌باشد، می‌توان با تعریف قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، هم‌زمان بیش از یک قطار را در یک بلاک اشغال اعزام نمود. به نوعی، ساختار بلاک متحرک در کنار بلاک ثابت موجود در نظر گرفته می‌شود و با توجه به متغیرهای کنترلی مانند مکان و سرعت قطارهای پیرو و پیشرو، اطلاعـات مربوط به وضعیت سیگنال با توجه به قوانین فازی تعریف شده به صورت فرمان حرکتی به سیستم‌های موجود در قطار انتقال می‌یابد.

از نتایج این روش مدل‌سازی می‌توان به افزایش ظرفیت شبکه و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها اشاره نمود. نوآوری اصلی آن اعزام هم‌زمان بیش از یک قطار در یک بلاک ثابت و فراهم نمودن امکان بهره‌مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد.در شکل ۱۱، شماتیک ساختار روش بلاک‌بندی سیستم سیگنالینگ ریلی به کمک شبکه پتری فازی نمایش داده شده است.

به منظور مدل‌سازی بلاک‌بندی در سیستم سیگنالینگ ریلی توسط شبکه پتری فازی ابتدا باید اطلاعات و داده‌های مورد نیاز مسئله از طریق متخصصین ریلی و پایگاه‌های داده جمع‌آوری گردد. سپس متغیرهای ورودی کنترلی (به همراه بازه و محدوده) فازی‌سازی و مقدار عددی متغیرها به مجموعه‌های فازی (مثلثی، ذوزنقه‌ای، گوسی و ...) تبدیل گردد.



شکل ۱۱. شماتیک ساختار روش بلاک‌بندی سیستم سیگنالینگ ریلی به کمک شبکه پتری فازی

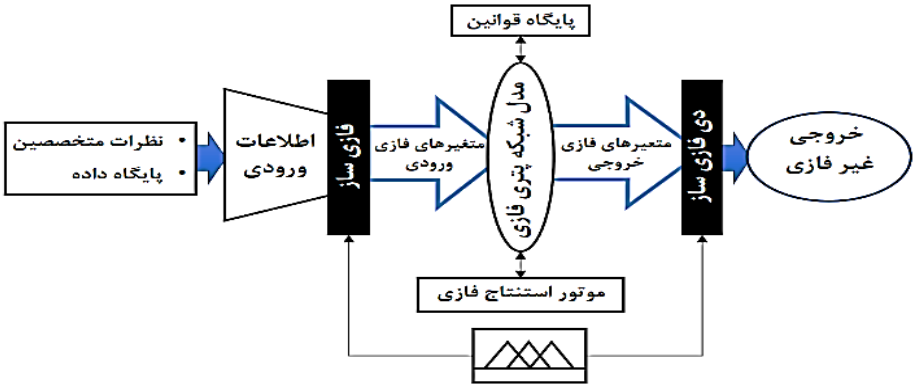
جهت فازی‌سازی ورودی‌های کنترلی، متغیرهای زبانی متناسب با هر ورودی انتخاب و بازه فازی مرتبط مطابق پایگاه داده‌های فنی و نظر متخصصین ریلی تعیین می‌گردد تا بتوان هر متغیر ورودی را به مجموعه فازی تبدیل نمود. عملیات فازی‌سازی با هدف نرمال‌سازی داده‌ها و پرهیز از پیچیدگی با استفاده از توابع خطی انجام می‌گیرد. در ادامه، ساختار شبکه پتری فازی با تعریف قوانین مناسب طراحی می‌گردد و در نهایت نتایج حاصل از قوانین از حالت فازی خارج شده و به صورت قطعی ارزش یک متغیر تصمیم‌گیری را بیان می‌کند.

یک سیستم استنتاج فازی دارای سه واحد اصلی فازی‌ساز[1]، موتور استنتاج فازی[2] و دی‌فازی‌ساز[3] است. فازی‌ساز داده‌های عددی را از ورودی سیستم دریافت کرده و به مقادیر فازی تبدیل می‌کند. از طریق موتور

[1]- Fuzzifier
[2]- Fuzzy Interference System
[3]- Defuzzifier

استنتاج فازی و پایگاه قوانین نتایج به قسمت دی‌فازی-ساز منتقل شده و دی‌فازی‌ساز نتایج فازی نهایی را به داده‌های عددی تبدیل می‌کند.

بدیهی است قدرت پردازش و زمان بهینه از مهم‌ترین مسائل در پیاده‌سازی سخت افزاری موتورهای استنتاج فازی می‌باشند. مدل فازی ممدانی (۱۹۷۵) مهم‌ترین موتور استنتاج فازی مبتنی بر قواعد جداگانه است که در آن هر قاعده در پایگاه قوانین فازی یک خروجی فازی را معین کرده و خروجی نهایی، ترکیب چند خروجی جداگانه مجموعه‌های فازی خواهد بود. عمل ترکیب را می‌توان به وسیله اجتماع یا اشتراک انجام داد. روش مرکز ثقل[1]نیز معروف‌ترین روش دی‌فازی‌سازی است. شماتیک سیستم استنتاج به کمک شبکه پتری فازی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. شماتیک سیستم استنتاج شبکه پتری فازی

۳-۱. تعریف متغیرهای کنترلی

تصمیم‌گیری جهت مجوز و یا عدم مجوز ورود قطار پیرو به یک بلاک بر اساس منطق فازی و با در نظر گرفتن الزامات ایمنی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

۱: موقعیت مکانی قطار پیشرو و پیرو که به کمک آن می‌توان موارد زیر را محاسبه نمود:

الف) سر فاصله مکانی دو قطار و ب) طول مسیر طی شده (یا باقیمانده) بلاک توسط قطار پیشرو

۲: سرعت لحظه‌ای قطار پیشرو و پیرو که به کمک آن می‌توان اختلاف سرعت دو قطار را محاسبه نمود.

با توجه به این عوامل تأثیرگذار و با هدف بهینه نمودن استفاده از ظرفیت خطوط، زمان سیر قطارها، بهره‌وری منابع و رضایتمندی مسافرین در خصوص وضعیت قطار پیرو موارد ذیل جهت تصمیم‌گیری تعریف می‌گردد:

۱: مجوز یا عدم مجوز ورود قطار پیرو به بلاک اشغال شده

۲: کاهش یا افزایش سرعت قطار پیرو

۳-۲. تعریف توابع عضویت متغیرهای کنترلی

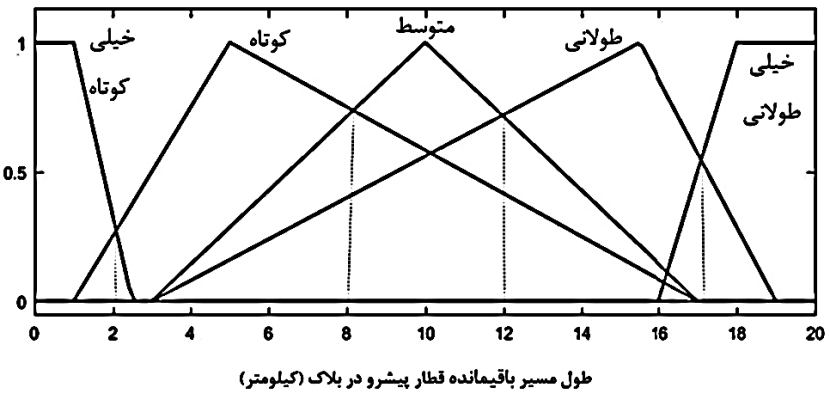
محاسبه متغیرهای کنترلی در یک زمان منطقی، از ویژگی-های اصلی یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری می‌باشد. عملیات فازی‌سازی متغیرهای کنترلی با در نظر گرفتن بازه فازی مناسب بر مبنای پایگاه داده‌های فنی و نظرات متخصصین ریلی و با بهره‌گیری از متغیرهای زبانی[2] متناسب با هر متغیر صورت می‌پذیرد، تا بتوان هر متغیر ورودی را به یک مجموعه فازی (مثلثی، ذوزنقه‌ای، گوسی و ...) تبدیل نمود و تابع عضویت فازی آن را به دست آورد.

[1]- Centroid

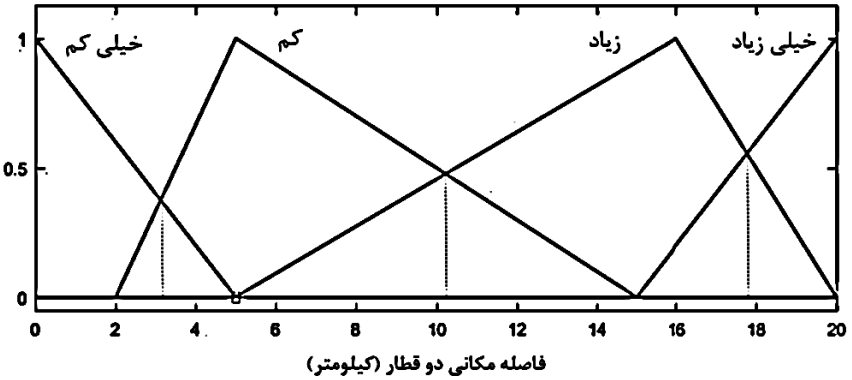
[2]- Linguistic Variables

با اندازه‌گیری سرعت و موقعیت مکانی دو قطار پیرو و پیشرو به صورت پیوسته می‌توان متغیرهای کنترلی تعریف شده را محاسبه نمود. با تعریف توابع عضویت مناسب جهت متغیرها، و با توجه به شرایط دو قطار پیرو و پیشرو، می‌توان در هر لحظه درجه عضویت بین صفر و یک به هر متغیر نسبت داد که ترکیب خروجی فازی متغیرهای کنترلی بیانگر درجه عضویت قطار در یک بلاک اشغال می‌باشد، که میزان وابستگی قطار به بلاک و آزاد یا اشغال بودن مسیر را نشان می‌دهد. سپس بر اساس درجه عضویت و با توجه به قوانین کنترلی فازی تعریف شده و با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، در خصوص مجوز یا عدم مجوز ورود قطار پیرو به یک بلاک و همچنین کاهش یا افزایش سرعت قطار پیرو می‌توان تصمیم‌گیری نمود.

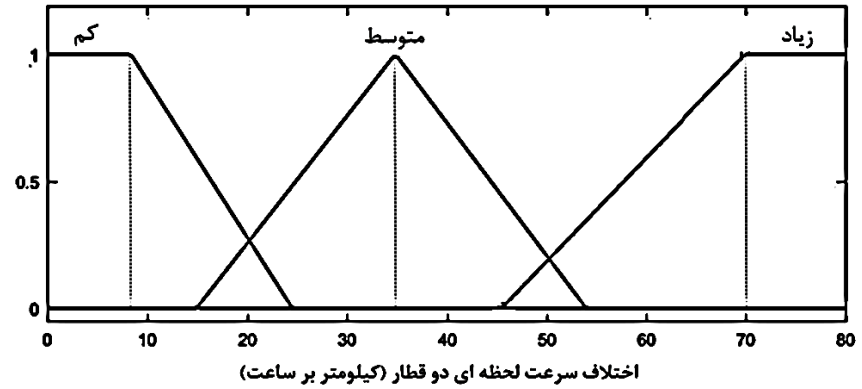
به عنوان مثال، اگر طول یک بلاک ثابت ۲۰ کیلومتر و حداکثر سرعت قطار ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شود، توابع عضویت طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو در یک بلاک، سر فاصله مکانی و اختلاف سرعت لحظه‌ای قطارهای پیشرو و پیرو به ترتیب در شکل‌های ۱۳، ۱٤ و ۱۵ نمایش داده شده است. به عنوان نمونه، در بررسی تابع عضویت طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو، مسافت کمتر از سه برابر طول قطار خیلی کوتاه، مسافت از سه برابر طول قطار تا کمتر از نصف بلاک پیموده شده منهای دو برابر طول قطار کوتاه، محدوده نصف بلاک پیموده شده به علاوه و منهای دو برابر طول قطار متوسط، بزرگتر از نصف بلاک پیموده شده به علاوه دو برابر طول قطار تا انتهای بلاک منهای سه برابر طول قطار مسافت طولانی و پس از آن مسافت خیلی طولانی می‌باشد.



شکل ۱۳. تابع عضویت طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو در بلاک



شکل ۱٤. تابع عضویت سر فاصله مکانی قطار پیشرو و پیرو



شکل ۱۵. تابع عضویت اختلاف سرعت قطار پیشرو و پیرو

۳-۳. تعریف قوانین کنترلی فازی

پس از محاسبه درجه عضویت متناسب با هر یک از متغیرهای کنترلی، می‌توان با تعریف قوانین فازی مناسب و با در نظر گرفتن الزامات ایمنی از قبیل فاصله ترمز قطارها، سرعت بیشینه خط و رعایت حداقل فاصله ایمنی بین قطارها، در خصوص مجوز و یا عدم مجوز ورود قطار پیرو به بلاک و نیز کاهش یا افزایش سرعت قطار پیرو تصمیم‌گیری نمود. قوانین فازی تعریف شده جهت تغییر رنگ چراغ سیگنال و اعمال فرمان به قطار پیرو در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه، جهت تعیین بازه و محدوده متغیرهای کنترلی در توابع عضویت فازی و همچنین تعریف قوانین فازی جهت تصمیم‌گیری در خصوص اعزام قطارها در یک بلاک اشغال با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، از پایگاه داده‌های فنی و متخصصین ریلی بهره‌گیری شده است. در تعریف قوانین فازی مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

۱: فرآیند اعزام قطارها در حالت بدون نقص فنی و توقف قطارها در بلاک در نظر گرفته شده است.

۲: حداقل سرعت قطار پیشرو ۳۵ کیلومتر بر ساعت باشد.

۳: بین دو قطار پیرو و پیشرو بلاک خالی وجود نداشته باشد.

٤: نوع دو قطار یکسان در نظر گرفته شده است.

در ادامه، با بهره‌گیری از این قوانین تعریف شده ساختار شبکه پتری فازی طراحی شده و در نهایت نتایج حاصل از اجرای استنتاج فازی و پایگاه قوانین به کمک روش مرکز ثقل از حالت فازی خارج و به صورت قطعی ارزش یک متغیر تصمیم‌گیری را بیان می‌کند. بر اساس آن، چراغ سیگنال موجود در سیستم بلاک ثابت به یکی از رنگ‌های زرد، سبز و یا قرمز در می‌آید.

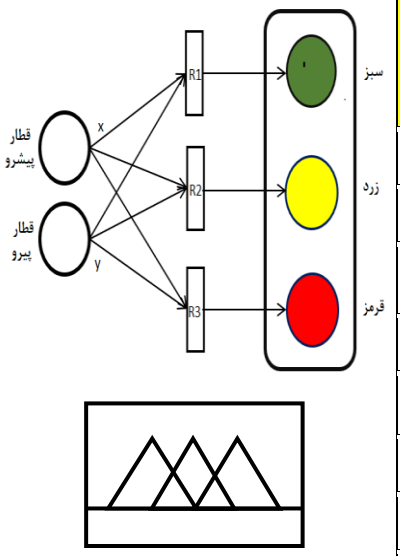
۳-٤. مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک

پس از تعریف قوانین فازی مناسب و با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، جهت تصمیم‌گیری سناریوهای پیش‌بینی شده بر اساس حالات مختلف متغیرهای کنترلی، به مدل‌سازی سیستم سیگنالینگ ریلی با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی پرداخته می‌شود.

در شکل ١٦، شماتیک مدل اختصاص درجه عضویت به قطار پیرو به کمک شبکه پتری فازی بر اساس درجه عضویت متغیرهای کنترلی نمایش داده شده است. پس از مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مدل شبکه پتری فازی، برخورد با هر گونه مشکل در آنالیز به منزله نقص در طراحی بوده و جهت رفع نقص باید طرح را بازبینی، اصلاح و مرحله آنالیز شبکه پتری فازی را مجدداً تکرار نمود تا تمام مشکلات موجود در آنالیز مرتفع و از بروز مشکلات احتمالی قبل از پیاده‌سازی جلوگیری گردد.

جدول ۱. پایگاه قوانین فازی تعریف شده جهت تغییر رنگ چراغ سیگنال و اعمال فرمان به قطار پیرو

آنگاه		اگر			
رنگ چراغ سیگنال	بازه درجه عضویت قطار پیرو	اختلاف سرعت قطار پیرو و قطار پیشرو	سرعت قطار پیشرو بیشتر از قطار پیرو باشد	سرعت قطار پیرو بیشتر از قطار پیشرو باشد	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو
سبز	[0.55 و 1]	–	–	–	خیلی کوتاه
سبز	[0.55 و 1]	کم	–	+	کوتاه
زرد	[0.45 و 0.55]	متوسط	–	+	کوتاه
قرمز	[0 و 0.45]	زیاد	–	+	کوتاه
سبز	[0.55 و 1]	کم	+	–	کوتاه
سبز	[0.55 و 1]	متوسط	+	–	کوتاه
سبز	[0.55 و 1]	زیاد	+	–	کوتاه
زرد	[0.45 و 0.55]	کم	–	+	متوسط
قرمز	[0 و 0.45]	متوسط	–	+	متوسط
قرمز	[0 و 0.45]	زیاد	–	+	متوسط
زرد	[0.45 و 0.55]	کم	+	–	متوسط
زرد	[0.45 و 0.55]	متوسط	+	–	متوسط
سبز	[0.55 و 1]	زیاد	+	–	متوسط
قرمز	[0 و 0.45]	کم	–	+	طولانی
قرمز	[0 و 0.45]	متوسط	–	+	طولانی
قرمز	[0 و 0.45]	زیاد	–	+	طولانی
قرمز	[0 و 0.45]	کم	+	–	طولانی
قرمز	[0 و 0.45]	متوسط	+	–	طولانی
زرد	[0.45 و 0.55]	زیاد	+	–	طولانی
قرمز	[0 و 0.45]	–	–	–	خیلی طولانی

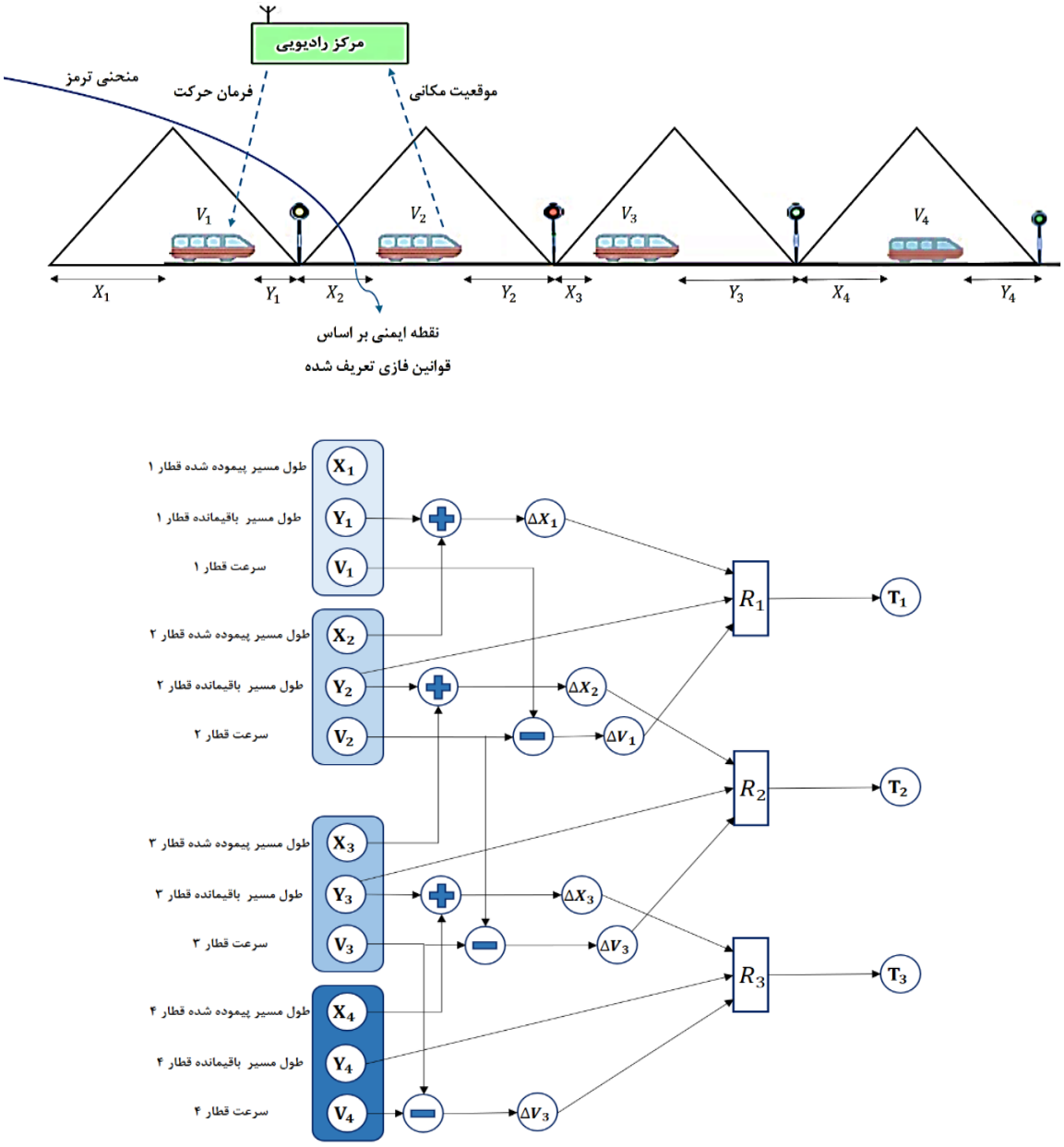


مسیر باقیمانده قطار پیشرو (کیلومتر)				
خیلی کوتاه	کوتاه	متوسط	طولانی	خیلی طولانی
۰–۲	۲–۸	۸–۱۲	۱۲–۱۷	۱۷–۲۰

سر فاصله مکانی دو قطار (کیلومتر)			
خیلی کم	کم	زیاد	خیلی زیاد
۰–۳	۳–۱۰	۱۰–۱۸	۱۸–۲۰

اختلاف سرعت دو قطار (کیلومتر بر ساعت)		
کم	متوسط	زیاد
۰–۲۰	۲۰–۵۰	۵۰–۸۰

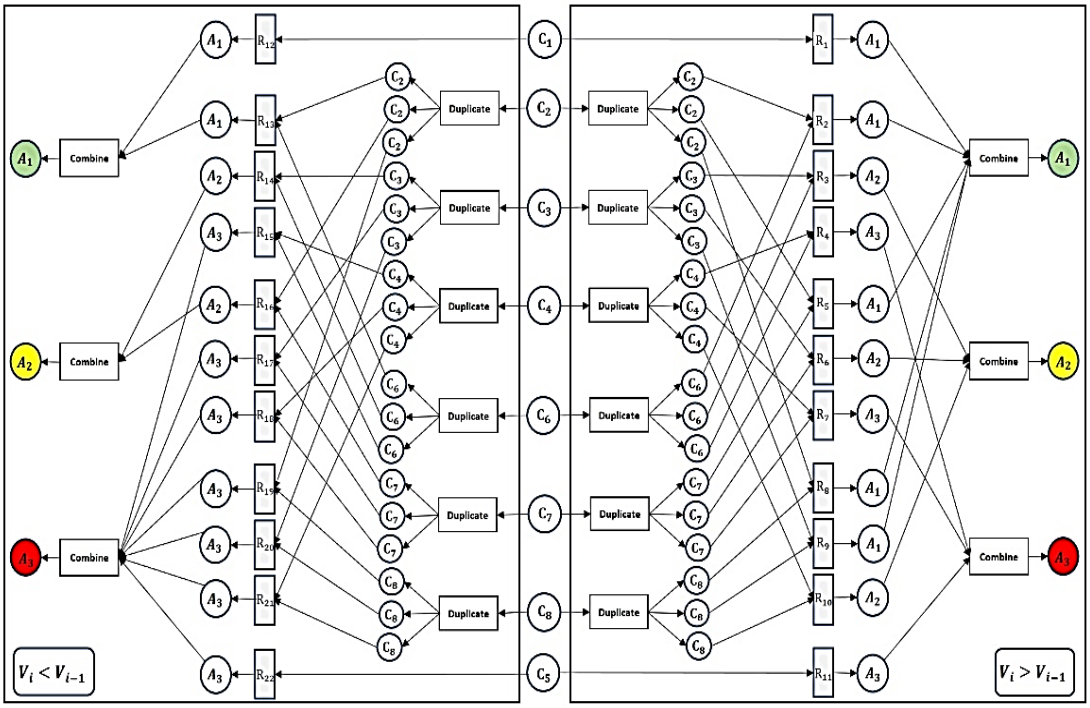
مدل‌سازی سیستم کنترلی سیگنالینگ ریلی با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی برای دو حالت که سرعت قطار پیشرو بیشتر و یا کمتر از قطار پیرو باشد، در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. به منظور بررسی صحت عملکرد مدل و کنترل سیستم سیگنالینگ، وجود یک شبیه‌ساز که امکان شبیه‌سازی سیستم سیگنالینگ را فراهم کند و همچنین قابلیت گسترش و اعمال تغییرات در حوزه کنترل اتوماتیک ترافیک را داشته باشد، ضروری می‌باشد.



شکل ۱۶. شماتیک مدل‌سازی اختصاص درجه عضویت به قطار پیرو به کمک شبکه پتری فازی بر اساس متغیرهای کنترلی

جهت شبیه‌سازی این روش مدل‌سازی به منظور بررسی صحت نتایج از نرم‌افزار متلب[1] استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۲ نمایش داده شده است. بررسی نتایج تصمیم‌گیری اعزام قطار پیشرو و پیرو در حالات مختلف، بر اساس درجه عضویت اختصاص یافته به قطار پیرو و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل کنترلی شبکه پتری فازی، بیانگر صحت عملکرد روش پیشنهادی بر اساس درجه عضویت اختصاصی به قطار پیرو، در خصوص تصمیم‌گیری اعزام قطارها در حالات مختلف می‌باشد.

[1]- MATLAB



C_1	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو خیلی کوتاه
C_2	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو کوتاه
C_3	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو متوسط
C_4	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو طولانی
C_5	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو خیلی طولانی

C_6	اختلاف سرعت دو قطار کم
C_7	اختلاف سرعت دو قطار متوسط
C_8	اختلاف سرعت دو قطار زیاد

A_1	مجوز ورود قطار پیرو به بلاک اشغال
A_2	مجوز ورود قطار پیرو با تقلیل سرعت به بلاک اشغال
A_3	عدم مجوز ورود قطار پیرو به بلاک اشغال

شکل ۱۷. مدل‌سازی سیستم کنترلی سیگنالینگ ریلی به کمک شبکه پتری فازی

یا توجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می‌گردد که در حالات مختلف عملکردی دو قطار، کنترل سیستم سیگنالینگ به خوبی صورت گرفته است. به عنوان نمونه، در حالتی که طول مسیر باقیمانده ۸ کیلومتر، اختلاف سرعت دو قطار ٦٠ کیلومتر بر ساعت و سر فاصله مکانی دو قطار ١٤ کیلومتر می‌باشد، با توجه به توابع عضویت متغیرهای کنترلی و اجرای استنتاج فازی رنگ چراغ به رنگ قرمز در آمده و از طرفی درجه عضویت اختصاص یافته به قطار پیرو و تصمیم‌گیری بر اساس آن نیز در محدوده قرمز قرار گرفته است که بیانگر صحت عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد. در حالات مرزی، مدل بر اساس ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر عمل می‌کند. به عنوان نمونه، در ردیف پنجم جدول و در حالتی که طول مسیر باقیمانده ۱۲ کیلومتر و اختلاف سرعت قطار پیرو ۱۰ کیلومتر بر ساعت بیشتر از قطار پیشرو باشد، در این حالت، مدل، فاصله ۱۲ کیلومتر که نقطه مرزی فاصله متوسط و طولانی در تابع عضویت می‌باشد را به عنوان فاصله طولانی در نظر گرفته است و فرمان رنگ قرمز را به جای زرد به چراغ سیگنال صادر می‌کند.

جدول ۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در خصوص تصمیم‌گیری اعزام قطارها در حالات مختلف

متغیرهای کنترلی							سناریوهای تصمیم‌گیری			
حالات مختلف	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو (کیلومتر)	سرعت قطار پیرو	سرعت قطار پیشرو	اختلاف سرعت دو قطار (کیلومتر بر ساعت)	سرفاصله مکانی دو قطار (کیلومتر)	مجوز ورود قطار پیرو به بلاک (چراغ سیگنال سبز)	مجوز ورود قطار پیرو به بلاک با کاهش سرعت (چراغ سیگنال زرد)	عدم مجوز ورود قطار پیرو به بلاک (چراغ سیگنال قرمز)	درجه عضویت قطار	صحت عملکرد
۱	۲	۱٤۰	۱۰۰	٤۰	۱۹	۰/۳۳٤	۰/۵۲۸	۰/٤۵	۰,۵۱٤	✓
۲	۸	۱۵۰	۹۰	٦۰	۱٤	۰/۳	۰/۳۷۵	۰/۸۱	۰/٤۲٦	✓
۳	۵	۱۱۰	۱٤۰	۳۰	۱٦	۰/۸۷۵	۰/۵۲	۰/٤۵۵	۰/٦۵۸	✓
٤	۱۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۰	۱۰	۰/۵۸۵	۰/۹٤	۰/۸٦	۰/۵۳	✓
۵	۱۲	۱۲۰	۱۱۰	۱۰	۹	۰/۵۱۸	۰/۷۹۷	۰/۹٦	۰/٤۳	✓
٦	۸	۱۵۰	۱۲۰	۳۰	۱۳	۰/۳	۰/۷۵۰	۰/۸۸	۰/٤٤	✓
۷	۱۷	۱۲۰	۱۳۰	۱۰	۵	۰/۳۵۲	۰/٤٤	۰/۸۷	۰/۳۳٤	✓
۸	۱	۱٤۵	۱۰۰	٤۵	۱۹	۱	۰/۳	۰/۲٤	۰/٦۷۷	✓
۹	۱۵	۱٦۰	۱۳۰	۳۰	٦	۰/۰۸۳	۰/٤۵۸	۰/۸۵۵	۰/۳٦۲	✓
۱۰	۱٤	۱۱۰	۹۰	۲۰	۸	۰/۲۵	۰/۳۳۹	۰/۵٦۵	۰/۳۸٦	✓
۱۱	۱٤	۹۵	۱۲۵	۳۰	۷	۰,٤	۰/۵۸۹	۰/۹۷۸	۰/۰٤	✓
۱۲	۱۵	۱۰۰	۱٦۰	٦۰	٦	۰/۳۵٤	۰,۷۸	۰/۵۷٦	۰/۵٤	✓

٤. نتیجه‌گیری

دو شاخص عمده در بررسی عملکرد و ایمنی شبکه‌های ریلی سر فاصله زمانی اعزام قطارها و ظرفیت خطوط می‌باشد که سیستم سیگنالینگ ریلی به عنوان یکی از اجزای اصلی شبکه ریلی تعیین‌کننده این دو پارامتر می‌باشد. در این مقاله، با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی، که تلفیقی از یک روش کلاسیک و هوشمند می‌باشد، به مدل‌سازی روش بلاک‌بندی فازی در سیستم سیگنالینگ ریلی مبتنی بر بلاک متحرک پرداخته شده است. از نتایج حاصل از این روش مدل‌سازی می‌توان به افزایش ظرفیت شبکه و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها اشاره نمود. نوآوری اصلی این روش مدل‌سازی، اعزام هم‌زمان بیش از یک قطار در یک بلاک ثابت و فراهم نمودن امکان بهره‌مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیانگر صحت عملکرد مدل پیشنهادی در خصوص تصمیم‌گیری اعزام قطارها در حالات مختلف دو قطار را نشان می‌دهد. به عنوان پیشنهاد جهت تحقیقات آینده می‌توان از شبکه‌های پتری فازی وزن‌دار جهت مدل‌سازی استفاده نمود و وزن متناسب با هر متغیر کنترلی را با توجه به میزان اهمیت آن انتخاب نمود.

۵. مراجع

Ahmad, F. and Khan, S. A. 2013. "Specification and verification of safety properties along a crossing region in a railway network control". Appl. Math. Modell., 37(7): 5162-5170.

Banik, M. and Dasgupta, R. 2011. "Modelling of railway network using Petri nets". Proceedings of the International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods (MSV).

Banik, M. and Ghosh, S. 2013. "Railway network modelling using petri nets". Int. J. Sci. Eng. Comput. Technol., 3(7): 249.

Bartkevičius, S., Bagdonas, V., Juraška, M. and Šarkauskas, K. 2005. "Train traffic simulation with coloured petri nets and schedule optimisation". Elektron. Elektrotech., 59(3).

Bjørk, J., Hagalisletto, A. M. and Enger, P. 2006. "Large scale simulations of Railroad nets". Proceedings of the Fourth International Workshop on Modelling of Objects, Components and Agents, MOCA,

Burkolter, D. M. 2005. "Capacity of railways in station areas using Petri nets". ETH Zurich.

Cheng, Y. H. and Yang, L. A. 2009. "A Fuzzy Petri nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system". Expert Syst. Appl., 36(4): 8040-8048.

Daian, G., Santa, M. and Letia, T. 2014. "Hierarchical railway traffic model for information systems". IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics.

Dhahbi, S., Abbas-Turki, A., Hayat, S. and El Moudni, A. 2011. "Study of the high-speed trains positioning system: European signaling system ERTMS/ETCS". 4th International Conference on Logistics.

Durmus, M. and Soylemez, M. 2009a. "Railway signalization and interlocking design via automation Petri nets". 7th Asian Control Conference.

Durmuş, M. S. and Söylemez, M. T. 2009b. "Automation Petri net based railway interlocking and signalization design". International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications.

Dutilleul, S. C., Defossez, F. and Bon, P. 2006. "Safety requirements and p-time Petri nets: A level crossing case study". The Proceedings of the Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications".

Fay, A. 2000. "A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control". Eng. Appl. Artif. Intell., 13(6): 719-729.

Gao, M., Zhou, M., Huang, X. and Wu, Z. 2003. "Fuzzy reasoning Petri nets". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, 33(3): 314-324.

Giua, A. and Seatzu, C. 2002. "Liveness enforcing supervisors for railway networks using ES/sup 2/PR Petri nets". Sixth International Workshop on Discrete Event Systems, 2002, Proceedings.

Giua, A. and Seatzu, C. 2008. "Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets". IEEE Trans. Automat. Sci. Eng., 5(3), 431-445.

Khan, S. A., Zafar, N. A., Ahmad, F. and Islam, S. 2014. "Extending Petri net to reduce control strategies of railway interlocking system". Appl. Math. Modell., 38(2): 413-424.

Liu, H. C., You, J. X., Li, Z. and Tian, G. 2017. "Fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning: A literature review". Eng. Appl. Artif. Intell., 60: 45-56.

Mamdani, E. H. and Assilian, S. 1975. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". Int. J. Man-Mach. Stud., 7(1): 1-13.

Marković, N., Milinković, S., Tikhonov, K. S. and Schonfeld, P. 2015. "Analyzing passenger train arrival delays with support vector regression". Transpo. Res., Part C: Emerg. Technol., 56: 251-262.

Milinković, S., Marković, M., Vesković, S., Ivić, M. and Pavlović, N. 2013. "A fuzzy Petri net model to estimate train delays". Simul. Modell. Prac. Theory, 33: 144-157.

Patra, A. P., Kumar, U. and Larsson-Kråik, P. O. 2009. "Assessment and improvement of railway track safety". International Heavy Haul Association Conference: 22/06/2009-24/06/2009.

Petri, C. A. 1962. "Kommunikation mit automaten". Dissertation. http://edoc.sub.uni-hamburg.de/informatik/volltexte/2011/160/

Siti Zaharah, I., Yue, W. and Somenahalli, S. 2009. "Petri nets approach in assessing the safety at level crossing- The effect of traffic and train characteristics on safety measurement". Conference: 32nd Australasian Transport Research Forum: The growth engine: Interconnecting transport performance, the economy and the environment, Auckland, New Zealand.

Suraj, Z. 2012. "Generalised fuzzy Petri nets for approximate reasoning in decision support systems". CS&P.

Takashige, T. 1999. "Signalling systems for safe railway transport". Japan Railway Transpo. Rev., 21: 44-50.

Van der Aalst, W. M. and Odijk, M. A. 1995. "Analysis of railway stations by means of interval timed coloured Petri nets". Real-time Syst., 9(3): 241-263.

Venkatarangan, M. and Yam, Y. 2014. "Modelling and simulation of two way railway traffic using extensions to Petri nets". 8th Asia Modelling Symposium.

Weng, Y. S., Huang, Y. S., Pan, Y. L. and Jeng, M. 2015. "Design of traffic safety control systems for railroads and roadways using timed Petri nets". Asian J. Control, 172): 626-635.
Wu, D. and Schnieder, E. 2016. "Scenario-based modeling of the on-board of a satellite-based train control system with colored petri nets". IEEE Trans. Intell. Transpo. Syst., 17(11): 3045-3061.
Wu, D. and Schnieder, E. 2018. "Scenario-based system design with colored petri nets: An application to train control systems". Soft. Syst. Model., 17(1): 295-317.
Yalçınkaya, Ö. and Bayhan, G. M. 2009. "Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology". Eur. J. Oper. Res., 196(1): 225-233.
Žarnay, M. 2004. "Use of Petri net for modelling of traffic in railway stations". Proceedings of International Conference Infotrans.
Zheng, W. 2009. "Modeling and hazard analysis of railway station protection system based on stochastic Petri nets". 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety.
Zhou, K. Q. and Zain, A. M. 2016. "Fuzzy Petri nets and industrial applications: A review". Artif. Intell. Rev., 45(4): 405-446.