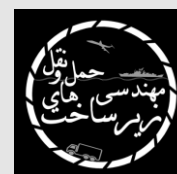




Semnan University



Research Article

Modeling of Moving Block Signaling System Using Fuzzy Petri Net

Milad Taherian^a , Abbas Dideban^{b*} , Zeynab Alimohammadi^c

^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.

^c Master of Science in Computer Engineering, Lecturer at Hejab Bastam Art School, Shahrood, 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. Alimohammadi, Z. (2024). 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](https://doi.org/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/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

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

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

مدل سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک با بهره گیری از شبکه پتری فازی

میلاد طاهریان^۱، عباس دیدبان^{۲*}، زینب علی محمدی^۳

^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

^۳ کارشناس ارشد مهندسی کامپیوتر، مدرس هنرستان حجاب بسطام، شاهرود، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲	سیستم سیگنالینگ به عنوان یکی از اجزای اصلی شبکه ریلی، نقشی تعیین کننده در ظرفیت خطوط و سر فاصله زمانی اعزام قطارها به عنوان دو شاخص عمده در بررسی عملکرد و ایمنی شبکه های 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 می باشد. در این مقاله، با بهره گیری از شبکه پتری فازی، به ارائه مدلی از بلاک بندی در سیستم سیگنالینگ ریلی و اعزام همزمان چند قطار در یک بلاک ثابت پرداخته شده است. در واقع، با بهره گیری از شبکه پتری فازی، به نوعی ساختار بلاک متحرک در کنار بلاک ثابت موجود در نظر گرفته می شود. 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 پیر و به یک بلاک تصمیم گیری می شود. نوآوری اصلی این روش، فراهم نمودن امکان بهره مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان نسبت به بلاک متحرک می باشد. از نتایج این روش می توان 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. علی محمدی، زینب. (۱۴۰۲). مدل سازی سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک با بهره گیری از شبکه پتری فازی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۴)، ۱۰۵-۱۲۶. doi: 10.22075/jtie.2024.32515.1659

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^۱ 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^۲ در نظر گرفت و از اتوماتا^۳ و شبکه‌های پتری^۴ 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 مسافری و کاهش مصرف انرژی می‌گردد (وندرا 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 (۲۰۱۴) به حل این مشکل با استفاده از شبکه پتری زمان‌دار تأخیری جهت مدل‌سازی رفتار اجزا سیستم پرداخته شده است. ونکاتارانگان و یان (۲۰۱۴) نیز مدلی جهت ترافیک سیستم ریلی که شامل ورود و خروج قطار در ایستگاه‌های مختلف، ازدحام افراد در

^۳- Automata

^۴- Petri nets

^۱- Headway

^۲- Discrete event system

ایستگاه‌ها، سوارشدن به قطار و پیاده شدن از قطار می- باشد 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 (۲۰۰۹ a) 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 (۲۰۰۹ b). زارنای (۲۰۰۴) 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 (۲۰۰۶) و جیا و ساتزو (۲۰۰۸) از شبکه پتری معمولی جهت مدل‌سازی استفاده نموده‌اند، در حالی که در مطالعات وو و اشنایدر (۲۰۱۶ 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، ژنگ (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 می- باشند 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 (۲۰۰۶) 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 خطرناک 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 (۲۰۱۴) 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 صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های پتری دارای عناصر کم، ولی کارآمد می- باشند 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

وابسته به آن می باشد سیستم سیگنالینگ ریلی است. سیستم سیگنالینگ شامل دو بخش تشخیص قطار و ارسال فرامین و کنترل حرکت قطارها می باشد و وظیفه حفظ فاصله ایمن بین دو قطار و جلوگیری از برخورد آن ها را بر عهده دارد. سیستم سیگنالینگ با توجه به درخواست اعزام کننده برای اختصاص یک مسیر به قطار، شرایط لازم را بررسی کرده و در صورت مجاز بودن مسیر درخواستی، تمامی المان های موجود در مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم و قفل می کند و مسیر به قطار اختصاص یافته و از ورود سایر قطارها به مسیر اختصاص داده شده به قطار، جلوگیری می کند (تاکاشیچی، ۱۹۹۹). پیاده سازی سیستم سیگنالینگ ریلی به دو روش بلاک ثابت و بلاک متحرک صورت می گیرد.

۲-۱-۱. سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت

سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت، سیستم معمول و رایج اکثر راه آهن ها در سراسر دنیا می باشد که بر اساس تجهیزات کنار خط طراحی و مورد استفاده قرار می گیرد. 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 قسمت های کوچکتری به نام بلاک تقسیم بندی می شود، 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 می توان به توقف های غیر ضروری و کاهش سرعت سیر، عدم بهره برداری مناسب از مسیر ریلی و همچنین ثابت بودن طول بلاک برای هر قطار با هر سرعتی اشاره نمود که در شرایط ترافیک سنگین قطارها پاسخگو نمی باشد.

نامعلوم را نداشته و در مواجهه با داده های دارای عدم قطعیت و مبهم نامناسب هستند. از آنجا که داده های مبهم با منطق فازی قابل نمایش هستند، از این رو، بهره گیری از شبکه های پتری فازی که ترکیب این شبکه ها با تئوری منطق فازی می باشد، مفید به نظر می رسد. در واقع، شبکه پتری فازی که به نوعی تلفیق یک روش کلاسیک و یک روش هوشمند می باشد، جهت افزایش قدرت مدل سازی شبکه های پتری به کار گرفته می شود. از آنجایی که تا کنون در تحقیقات گذشته از شبکه های پتری فازی در زمینه کنترل سیستم سیگنالینگ ریلی و بهبود ظرفیت خطوط استفاده نشده و با توجه به مزایای شبکه پتری فازی، این مقاله با بهره گیری از شبکه پتری فازی و تعریف قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی به مدل سازی 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 بهره مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی را فراهم می کند.

در ادامه این مقاله، ابتدا مفاهیم پایه سیستم سیگنالینگ ریلی و انواع آن مورد بررسی قرار می گیرد. سپس شبکه های پتری فازی و خواصی از این شبکه ها که در مدل سازی سیستم سیگنالینگ ریلی مد نظر می باشد معرفی شده و در نهایت به مدل سازی سیستم سیگنالینگ پیشنهادی با بهره گیری از شبکه پتری فازی پرداخته و نتایج بهبود حاصل از آن به کمک شبیه سازی ارائه می شود.

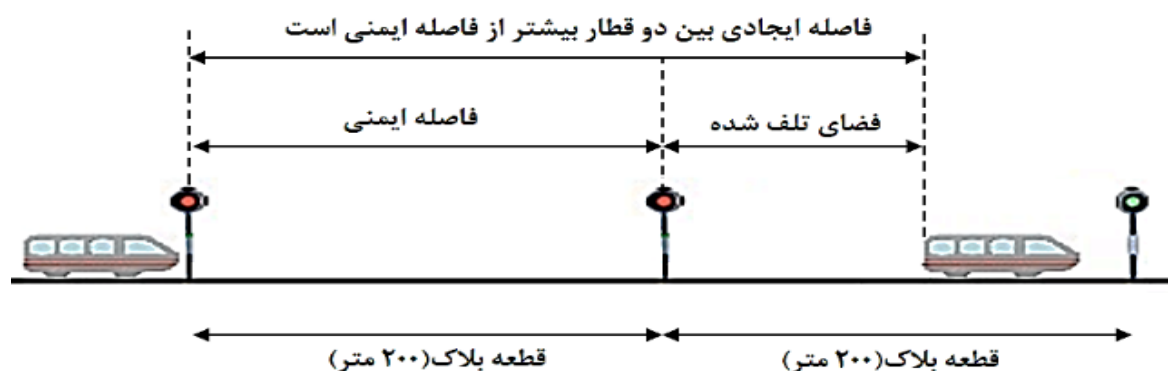
۲. مفاهیم اساسی

۲-۱. سیستم سیگنالینگ ریلی

یکی از مهم ترین زیرساخت های راه آهن که قابلیت اطمینان، ایمنی و حتی تا حد زیادی سرعت قطارها

خطوط و وجود فواصل زمانی و مکانی تلف شده در سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت می‌باشد.

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



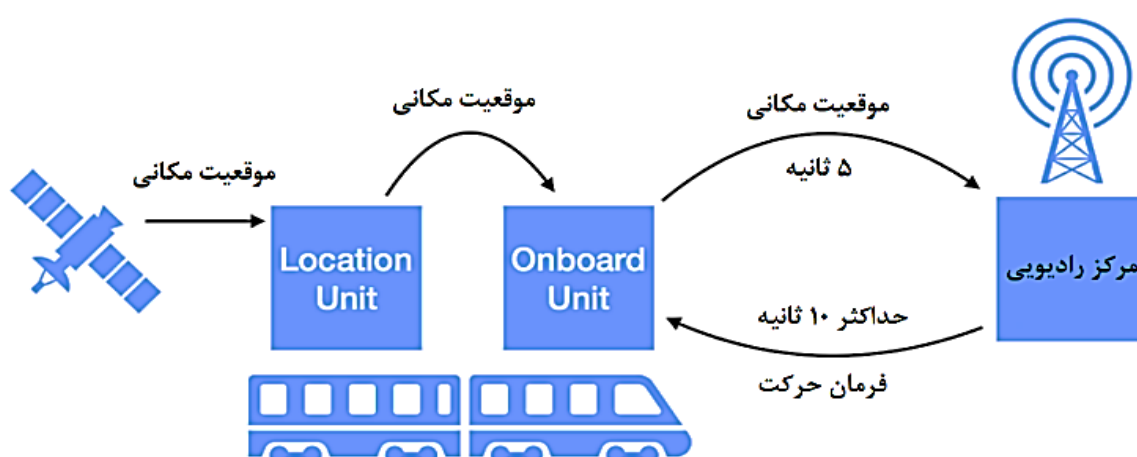
شکل ۱. وجود فضای تلف شده در سیستم سیگنالینگ بلاک ثابت

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.

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



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

که با توجه به دینامیک بودن، بسته به شرایط می تواند 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 می توان یا از طریق شبکه ثابت بلاک ها 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 حمل و نقل در این مسیر می باشد. محاسبه ظرفیت خطوط ریلی، پیچیده تر از محاسبه ظرفیت سایر شیوه های حمل و نقلی است. خصوصیات زیرساختی، مشخصات ناوگان و نحوه زمان بندی حرکت قطارها، عواملی هستند که در تعیین ظرفیت محورهای ریلی تأثیر می گذارند. متداول ترین روش محاسبه ظرفیت ریلی، رابطه اسکات^۶ (۱) می باشد که در این روش، ظرفیت بلاک بر اساس زمان سیر کندترین قطار در بلاک در نظر گرفته می شود.

$$C = \frac{1440 - W}{T + t} * K \quad (1)$$

تنظیم فاصله دینامیک در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک بر طبق استاندارد اروپایی سیستم مدیریت ترافیک ریلی^۱ (ERTMS) و سیستم کنترل قطار^۲ (ETCS) که کنترل اطلاعات بر پایه انتقال بی سیم را فراهم می کند، در سه سطح تعیین می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.

در سطح اول، سیگنال علائم از طریق واحدهای الکترونیکی کنار خط^۳ (LEU) به بالیس های^۴ نصب شده روی تراورس ها^۵ متصل می شود. بالیس ها علاوه بر انتقال اطلاعات مربوط به مکان فعلی قطار، اطلاعات مربوط به وضعیت سیگنال را نیز به سیستم های موجود در قطار منتقل می کنند. 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 مکان یابی شده و انتقال اطلاعات بی سیم و با استفاده از سیستم رادیویی می باشد. در این سطح وجود بلاک، مرکز رادیویی^۱ (RBC) که در کنار خط و در مسیرهایی به طول ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر نصب می گردد، توجیهی بابت استفاده از سطح یک باقی نگذاشته و دیگر نیازی به وجود سیگنال در کنار خط نمی باشد. در این حالت، فاصله ترمز یک مقدار ثابت نمی باشد، بلکه کمیتی است

⁶- Radio Block Center

⁷- Scott

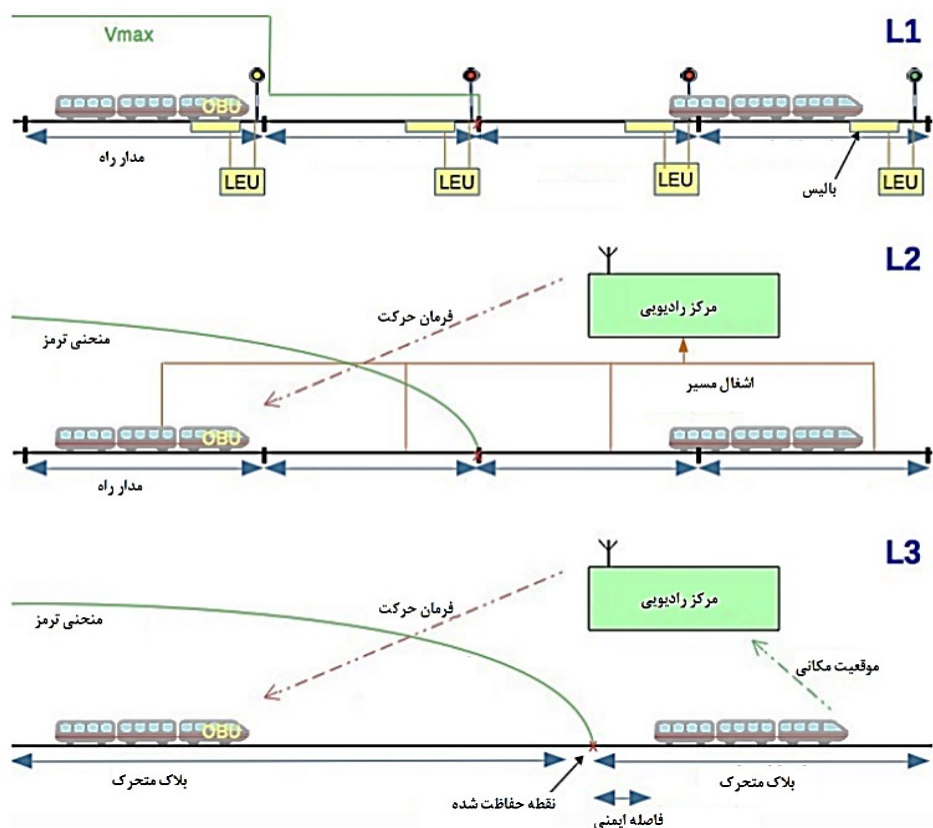
¹- European Rail Traffic Management System

²- European Train Control System

³- Line side Electronic Unit

⁴- Balise

⁵- Traverse



شکل ۳. تنظیم فاصله دینامیک در سیستم سیگنالینگ بلاک متحرک

(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 می‌باشند 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،

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.

۳-۲. شبکه‌های پتری فازی

ایده شبکه‌های پتری برای نخستین بار توسط کارل آدام پتری در سال ۱۹۶۲ در رساله دکتری وی معرفی گردید

• $P = \{P_1, \dots, P_n\}$: مجموعه ای متناهی و غیر تهی از مکان ها است.

• $T = \{T_1, \dots, T_n\}$: مجموعه ای متناهی و غیر تهی از گذرگاه ها است.

• $D = \{D_1, \dots, D_n\}$: مجموعه ای متناهی و غیر تهی از گزاره ها است به طوری که: $\emptyset \cdot |P| = |D|$

• $I: T \rightarrow P^\infty$ تابع ورودی (مکان های ورودی به گذرگاه)

• $O: T \rightarrow P^\infty$ تابع خروجی (مکان های خروجی از گذرگاه)

• $f: T \rightarrow [0,1]$ تابعی که هر گذرگاه را به یک عدد حقیقی بین صفر و یک نسبت می دهد (درجه عضویت هر گذرگاه)

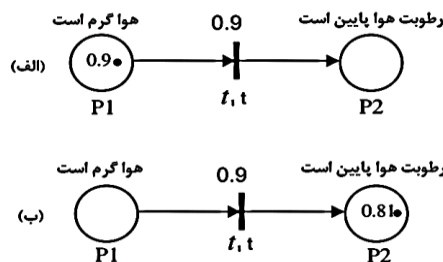
• $\alpha: P \rightarrow [0,1]$ تابعی که هر مکان را به یک عدد حقیقی

بین صفر و یک نسبت می دهد (درجه عضویت هر مکان)

• $\beta: P \rightarrow D$ تابعی که هر مکان را به یک گزاره نسبت می دهد.

در شکل ۴، نمونه ای از یک شبکه پتری فازی نمایش داده شده که روابط حاکم بر آن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} P &= \{p_1, p_2\} \cdot T = \{t_1\} \cdot I(t_1) \\ &= \{p_1\} \cdot O(t_1) = \{p_2\} \\ D &= \{\text{رطوبت هوا کم است, هوا گرم است}\} \\ \beta(p_1) &= \{\text{هوا گرم است}\} \cdot \beta(p_2) \\ &= \{\text{رطوبت هوا کم است}\} \\ F(t_1) &= 0.9 \cdot \alpha(p_1) = 0.9 \cdot \alpha(p_2) = 0 \end{aligned}$$



شکل ۴. الف) قبل از آتش شدن و ب) بعد از آتش شدن گذرگاه

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 سیستم های در حال بهره برداری و زیر بار نیز به کار می رود. یک شبکه پتری با یک پنج تایی مرتب به صورت (P, T, I, O, M_0) نمایش داده می شود که در آن:

• $P = \{P_1, \dots, P_n\}$: مجموعه ای متناهی و غیر تهی از مکان ها است.

• $T = \{T_1, \dots, T_n\}$: مجموعه ای متناهی و غیر تهی از گذرگاه ها است.

• I : مجموعه ای از کمان ها که از مکان ها به گذرگاه ها متصل است (کمان های ورودی).

• O : مجموعه ای از کمان ها که از گذرگاه ها به مکان ها متصل است (کمان های خروجی).

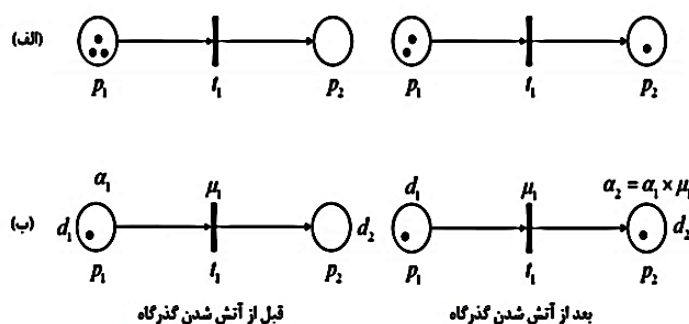
• M_0 : تعداد اولیه نشانه ها (تابع علامت گذاری اولیه)

شبکه های پتری برای مدل کردن سیستم هایی که به طور دقیق توصیف می شوند کاربرد دارند و در مواجهه با داده های دارای عدم قطعیت نامناسب می باشند. از آنجا که داده های مبهم با منطق فازی قابل نمایش هستند، ادغام تئوری منطق فازی با شبکه های پتری، جهت افزایش قدرت مدل سازی شبکه های پتری، مفید به نظر می رسد (سوراج، ۲۰۱۲). شبکه های پتری فازی توسط لونی به عنوان یک مدل توسعه یافته از شبکه های پتری در سال ۱۹۸۸ معرفی شده است (ژو و زین، ۲۰۱۶).

یک شبکه پتری فازی با یک هشت تایی مرتب به صورت $(P, T, D, I, O, f, \alpha, \beta)$ نمایش داده می شود، که در آن:

قطعیت^۱ (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).

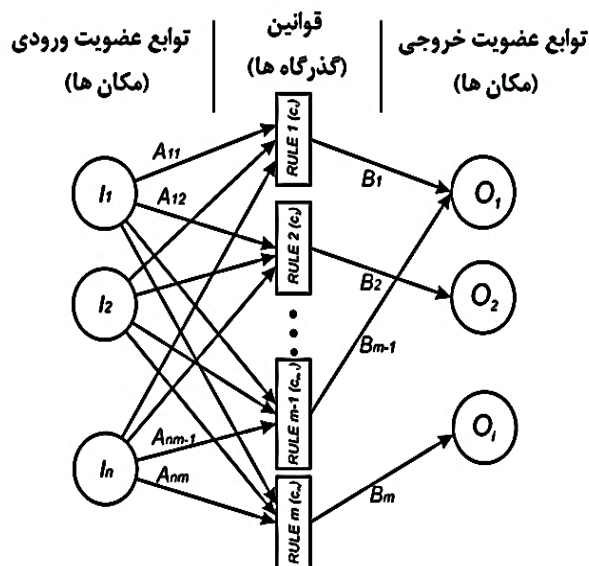
در شبکه‌های پتری فازی، به هر مکان یک گزاره با درجه عضویت بین صفر و یک نسبت داده می‌شود و بر خلاف شبکه پتری معمولی تعداد نشانه یک مکان نمی‌تواند از یک بیشتر باشد. همچنین، با هر بار آتش شدن یک گذرگاه نشانه یک مکان از بین نمی‌رود. درجه



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

فازی محسوب شده و سایر اجزای سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قوانین به شکل مؤثر استفاده می‌شوند. در شکل ۶، شماتیک کلی شبکه‌های پتری فازی نمایش داده شده است.

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"^۲ استفاده می‌شود. پایگاه قوانین^۳ به نوعی قلب یک سیستم



شکل ۶. نمایش کلی شبکه پتری فازی

^۲- IF-THEN

^۳- Rule base

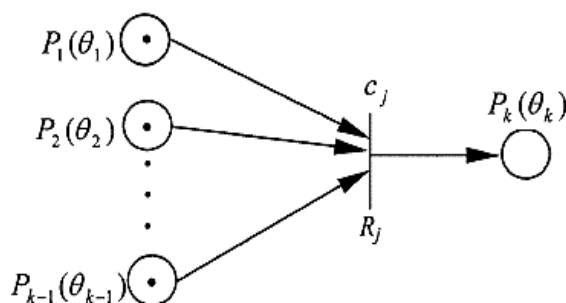
^۱- Certainty Factor

مرتبط با قانون فازی R_j می باشد (گائو و همکاران، ۲۰۰۳).

ساختار اشتراک یا AND:

$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \wedge P_2(\theta_2) \wedge \dots \wedge P_{k-1}(\theta_{k-1}) \rightarrow P_k(\theta_k)$$

$$\theta_k = \min\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{k-1}\} * c_j$$

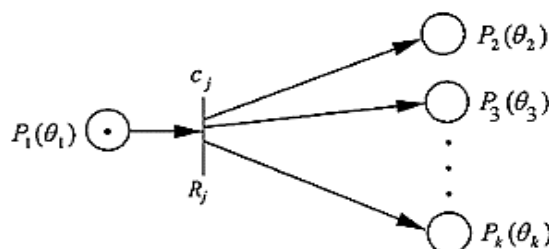


شکل ۷. نمایش قانون ساختار AND توسط شبکه پتری فازی

ساختار انشعاب:

$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \rightarrow P_2(\theta_2) \wedge \dots \wedge P_{k-1}(\theta_{k-1}) \wedge P_k(\theta_k)$$

$$\theta_2 = \theta_1 * c_j, \theta_3 = \theta_1 * c_j, \dots, \theta_k = \theta_1 * c_j$$

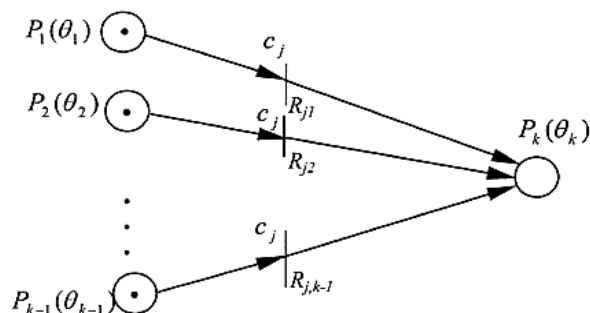


شکل ۸. نمایش قانون ساختار انشعاب توسط شبکه پتری فازی

ساختار اجتماع یا OR:

$$R_j(c_j): P_1(\theta_1) \vee P_2(\theta_2) \vee \dots \vee P_{k-1}(\theta_{k-1}) \rightarrow P_k(\theta_k)$$

$$\theta_k = \max\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{k-1}\} * c_j$$



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.

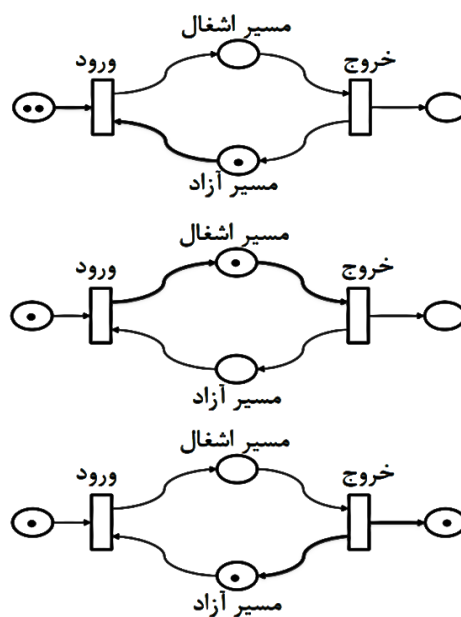
۳. مدل‌سازی بلاک‌بندی توسط شبکه پتری فازی

به منظور طراحی یک سیستم سیگنالینگ با بهره‌گیری از شبکه پتری فازی در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری^۱، 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 بلاک‌بندی 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

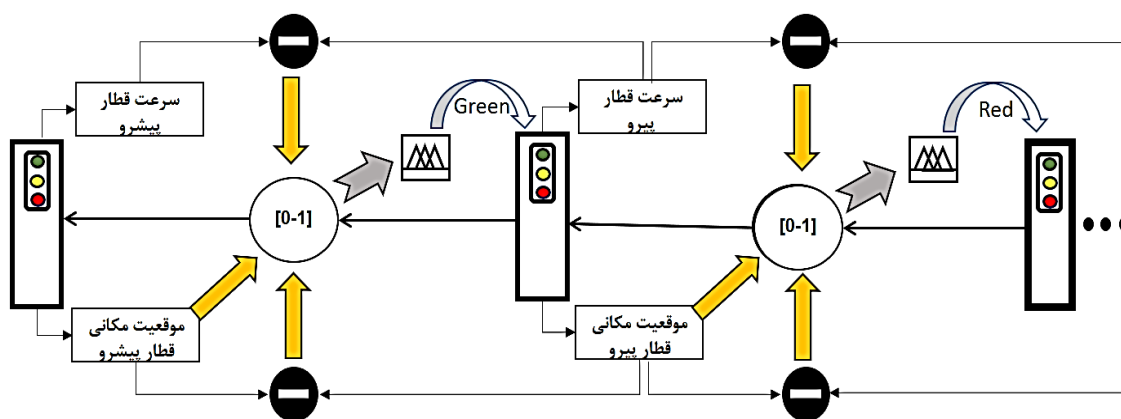
متغیر کنترلی نسبت داده می‌شود. به عبارت دیگر، میزان وابستگی قطار به یک بلاک اشغال فازی از طریق ترکیب خروجی فازی متغیرهای کنترلی و با درجه عضویت بین یک و صفر تعیین می‌گردد. در نتیجه، برخلاف مدل پتری

^۱- Desicion Support System

اشاره نمود. نوآوری اصلی آن اعزام هم زمان بیش از یک قطار در یک بلاک ثابت و فراهم نمودن امکان بهره مندی از مزایای سیستم بلاک متحرک بدون نیاز به تغییر سیستم قبلی و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان می باشد. در شکل ۱۱، شماتیک ساختار روش بلاک بندی سیستم سیگنالینگ ریلی به کمک شبکه پتری فازی نمایش داده شده است. به منظور مدل سازی بلاک بندی در سیستم سیگنالینگ ریلی توسط شبکه پتری فازی ابتدا باید اطلاعات و داده های مورد نیاز مسئله از طریق متخصصین ریلی و پایگاه های داده جمع آوری گردد. سپس متغیرهای ورودی کنترلی (به همراه بازه و محدوده) فازی سازی و مقدار عددی متغیرها به مجموعه های فازی (مثلثی، دوزنقه ای، گوسی و ...) تبدیل گردد.

معمولی که درجه عضویت قطار یک یا صفر بوده و متناسب با آن وضعیت بلاک اشغال یا آزاد می باشد، در مدل پتری فازی با توجه به درجه عضویت قطار که بین صفر و یک می باشد، می توان با تعریف قوانین فازی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی، هم زمان بیش از یک قطار را در یک بلاک اشغال اعزام نمود. به نوعی، ساختار بلاک متحرک در کنار بلاک ثابت موجود در نظر گرفته می شود و با توجه به متغیرهای کنترلی مانند مکان و سرعت قطارهای پیرو و پیشرو، اطلاعات مربوط به وضعیت سیگنال با توجه به قوانین فازی تعریف شده به صورت فرمان حرکتی به سیستم های موجود در قطار انتقال می یابد.

از نتایج این روش مدل سازی می توان به افزایش ظرفیت شبکه و کاهش سر فاصله زمانی اعزام قطارها



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

قوانین مناسب طراحی می گردد و در نهایت نتایج حاصل از قوانین از حالت فازی خارج شده و به صورت قطعی ارزش یک متغیر تصمیم گیری را بیان می کند. یک سیستم استنتاج فازی دارای سه واحد اصلی فازی سازی^۱، موتور استنتاج فازی^۲ و دی فازی سازی^۳ است. فازی سازی داده های عددی را از ورودی سیستم دریافت کرده و به مقادیر فازی تبدیل می کند. از طریق موتور

جهت فازی سازی ورودی های کنترلی، متغیرهای زبانی متناسب با هر ورودی انتخاب و بازه فازی مرتبط مطابق پایگاه داده های فنی و نظر متخصصین ریلی تعیین می گردد تا بتوان هر متغیر ورودی را به مجموعه فازی تبدیل نمود. عملیات فازی سازی با هدف نرمال سازی داده ها و پرهیز از پیچیدگی با استفاده از توابع خطی انجام می گیرد. در ادامه، ساختار شبکه پتری فازی با تعریف

³- Defuzzifier

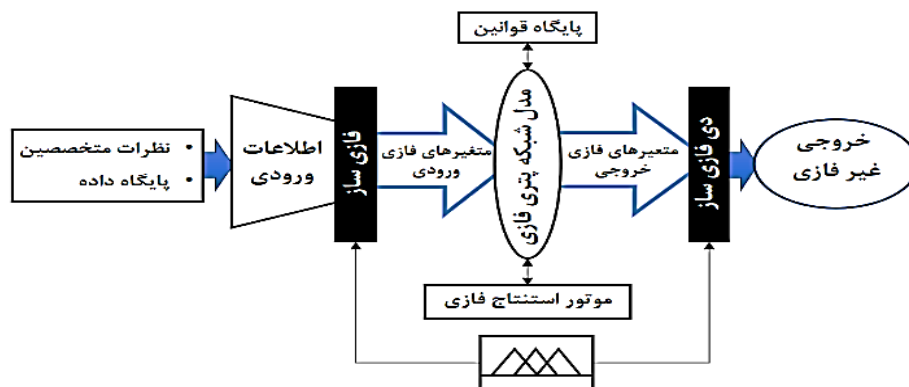
¹- Fuzzifier

²- Fuzzy Interference System

استنتاج فازی و پایگاه قوانین نتایج به قسمت دی فازی- ساز منتقل شده و دی فازی ساز نتایج فازی نهایی را به داده های عددی تبدیل می کند.

بدیهی است قدرت پردازش و زمان بهینه از مهم ترین مسائل در پیاده سازی سخت افزاری موتورهای استنتاج فازی می باشند. مدل فازی ممدانی (۱۹۷۵) مهم ترین 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 مجموعه های فازی خواهد بود. عمل ترکیب را می توان به وسیله اجتماع یا اشتراک انجام داد. روش مرکز ثقل نیز معروف ترین روش دی فازی سازی 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

تصمیم گیری 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 مهم ترین آنها عبارت اند از:

۱: موقعیت مکانی قطار پیشرو و پیرو که به کمک آن می توان 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 لحظه ای قطار پیشرو و پیرو که به کمک آن می توان 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، بهره وری منابع و رضایتمندی مسافری در خصوص وضعیت قطار پیرو موارد ذیل جهت تصمیم گیری تعریف می گردد:

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

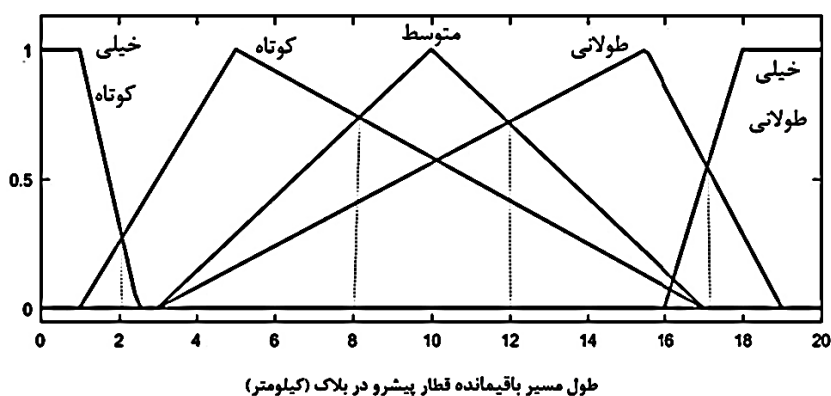
محاسبه متغیرهای کنترلی در یک زمان منطقی، از ویژگی های اصلی یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری می باشد. عملیات فازی سازی متغیرهای کنترلی با در نظر گرفتن بازه فازی مناسب بر مبنای پایگاه داده های فنی و نظرات متخصصین ریلی و با بهره گیری از متغیرهای زبانی^۲ متناسب با هر متغیر صورت می پذیرد، تا بتوان هر متغیر ورودی را به یک مجموعه فازی (مثلی، دوزنقه ای، گوسی و ...) تبدیل نمود و تابع عضویت فازی آن را به دست آورد.

²- Linguistic Variables

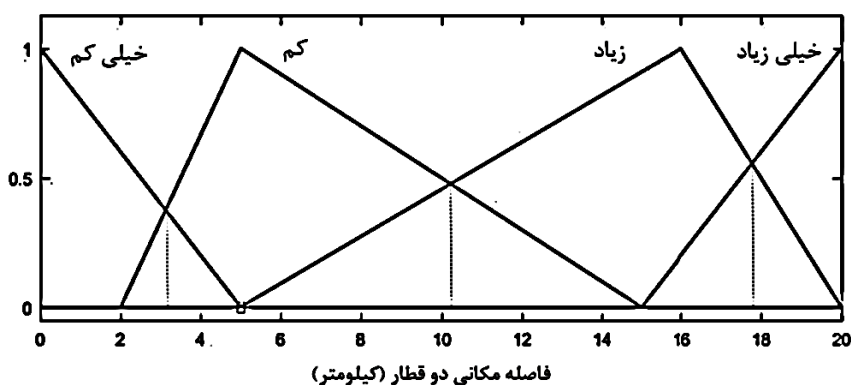
¹- Centroid

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 لحظه ای قطارهای پیشرو و پیرو به ترتیب در شکل های ۱۳، ۱۴ 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 می باشد.

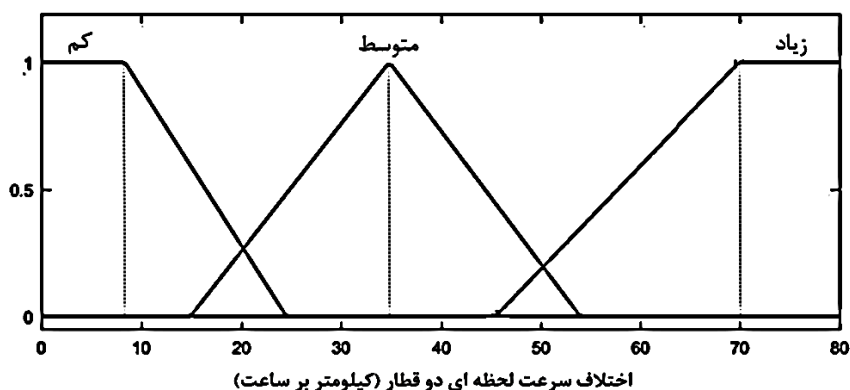
با اندازه گیری سرعت و موقعیت مکانی دو قطار پیرو و پیشرو به صورت پیوسته می توان متغیرهای کنترلی تعریف شده را محاسبه نمود. با تعریف توابع عضویت مناسب جهت متغیرها، و با توجه به شرایط دو قطار پیرو و پیشرو، می توان در هر لحظه درجه عضویت بین صفر و یک به هر متغیر نسبت داد که ترکیب خروجی فازی متغیرهای کنترلی بیانگر درجه عضویت قطار در یک بلاک اشغال می باشد، که میزان وابستگی قطار به بلاک و آزاد یا اشغال بودن مسیر را نشان می دهد. 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 می توان تصمیم گیری نمود.



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



شکل ۱۴. 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.
- ۴: 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.

۳-۴. 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 ۱۶، 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
	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو	سرعت قطار پیرو بیشتر از قطار پیشرو باشد	سرعت قطار پیشرو بیشتر از قطار پیرو باشد	اختلاف سرعت قطار پیرو و قطار پیشرو		
سبز	خیلی کوتاه	-	-	-	سبز	[0.55 و 1]
سبز	کوتاه	+	-	کم	سبز	[0.55 و 1]
زرد	کوتاه	+	-	متوسط	زرد	[0.45 و 0.55]
قرمز	کوتاه	+	-	زیاد	قرمز	[0 و 0.45]
سبز	کوتاه	-	+	کم	سبز	[0.55 و 1]
سبز	کوتاه	-	+	متوسط	سبز	[0.55 و 1]
سبز	کوتاه	-	+	زیاد	سبز	[0.55 و 1]
زرد	متوسط	+	-	کم	زرد	[0.45 و 0.55]
قرمز	متوسط	+	-	متوسط	قرمز	[0 و 0.45]
قرمز	متوسط	+	-	زیاد	قرمز	[0 و 0.45]
زرد	متوسط	-	+	کم	زرد	[0.45 و 0.55]
زرد	متوسط	-	+	متوسط	زرد	[0.45 و 0.55]
سبز	متوسط	-	+	زیاد	سبز	[0.55 و 1]
قرمز	طولانی	+	-	کم	قرمز	[0 و 0.45]
قرمز	طولانی	+	-	متوسط	قرمز	[0 و 0.45]
قرمز	طولانی	+	-	زیاد	قرمز	[0 و 0.45]
قرمز	طولانی	-	+	کم	قرمز	[0 و 0.45]
قرمز	طولانی	-	+	متوسط	قرمز	[0 و 0.45]
زرد	طولانی	-	+	زیاد	زرد	[0.45 و 0.55]
قرمز	خیلی طولانی	-	-	-	قرمز	[0 و 0.45]

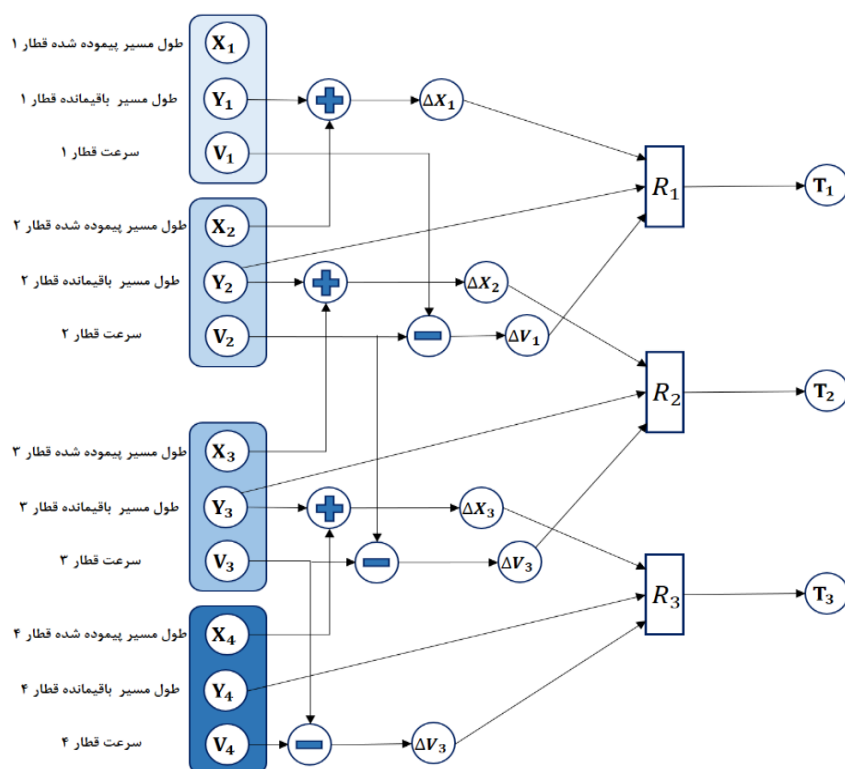
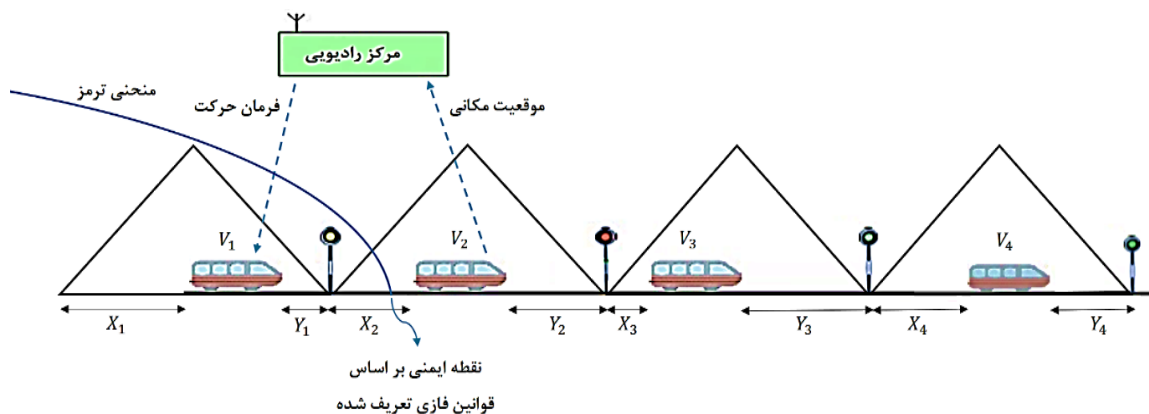
مسیر باقیمانده قطار پیشرو (کیلومتر)				
خیلی کوتاه	کوتاه	متوسط	طولانی	خیلی طولانی
۰-۲	۲-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۷	۱۷-۲۰

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

مدل و کنترل سیستم سیگنالینگ، وجود یک شبیه ساز که امکان شبیه سازی سیستم سیگنالینگ را فراهم کند و همچنین قابلیت گسترش و اعمال تغییرات در حوزه کنترل اتوماتیک ترافیک را داشته باشد، ضروری می باشد.

مدل سازی سیستم کنترلی سیگنالینگ ریلی با بهره گیری 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

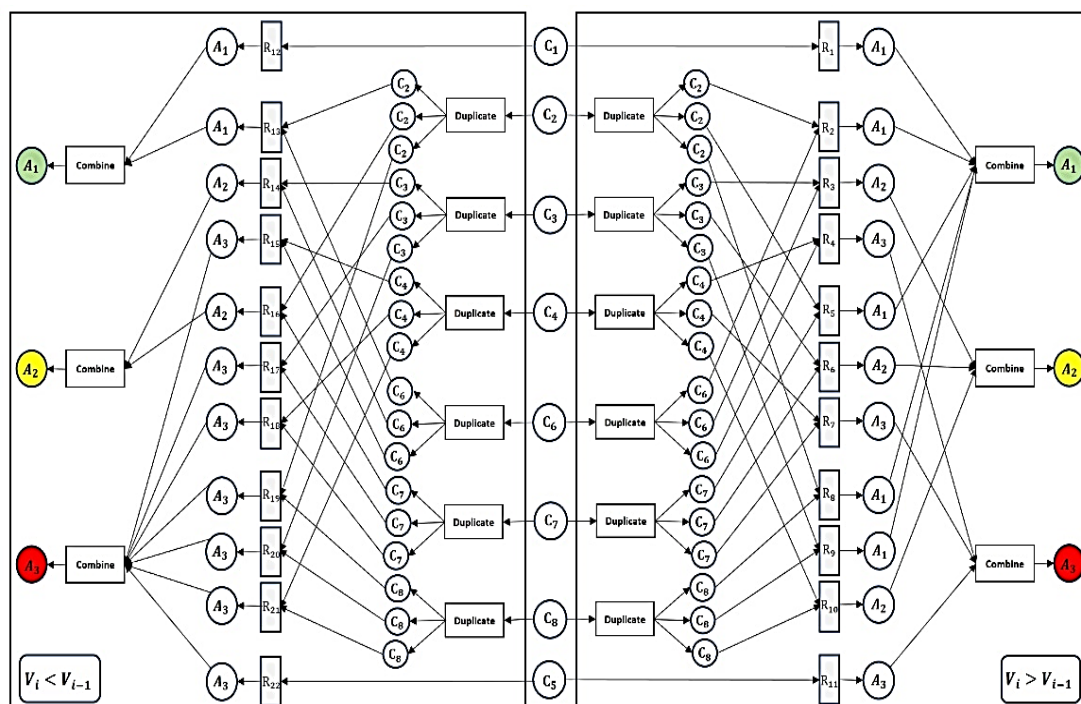


شکل ۱۶. شماتیک مدل سازی اختصاص درجه عضویت به قطار پیرو به کمک شبکه پتری فازی بر اساس متغیرهای کنترلی

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 تصمیم گیری اعزام قطارها در حالات مختلف می باشد.

جهت شبیه سازی این روش مدل سازی به منظور بررسی صحت نتایج از نرم افزار متلب^۱ استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۲ نمایش داده شده است. بررسی نتایج تصمیم گیری اعزام قطار پیشرو و پیرو در حالات مختلف، بر اساس درجه عضویت اختصاص

^۱- 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. مدل سازی سیستم کنترلی سیگنالینگ ریلی به کمک شبکه پتری فازی

روش پیشنهادی می باشد. در حالات مرزی، مدل بر اساس ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر عمل می کند. 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 می باشد را به عنوان فاصله طولانی در نظر گرفته است و فرمان رنگ قرمز را به جای زرد به چراغ سیگنال صادر می کند.

یا توجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می گردد 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 ۶۰ کیلومتر بر ساعت و سر فاصله مکانی دو قطار ۱۴ کیلومتر می باشد، 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 تصمیم گیری بر اساس آن نیز در محدوده قرمز قرار گرفته است که بیانگر صحت عملکرد

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

حالات مختلف	طول مسیر باقیمانده قطار پیشرو (کیلومتر)	سرعت قطار پیشرو	سرعت قطار	سرعت اختلاف	سرفاصله مکانی دو قطار (کیلومتر)	مجاز ورود قطار پیرو به بلاک (چراغ سیگنال سبز)	مجاز ورود قطار پیرو به بلاک با کاهش سرعت (چراغ سیگنال زرد)	سناریوهای تصمیم‌گیری		
								عدم مجوز ورود قطار پیرو به بلاک (چراغ سیگنال قرمز)	درجه عضویت قطار	صحت عملکرد
۱	۲	۱۴۰	۱۰۰	۴۰	۱۹	۰/۳۳۴	۰/۵۲۸	۰/۴۵	۰/۵۱۴	✓
۲	۸	۱۵۰	۹۰	۶۰	۱۴	۰/۳	۰/۳۷۵	۰/۸۱	۰/۴۲۶	✓
۳	۵	۱۱۰	۱۴۰	۳۰	۱۶	۰/۸۷۵	۰/۵۲	۰/۴۵۵	۰/۶۵۸	✓
۴	۱۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۰	۱۰	۰/۵۸۵	۰/۹۴	۰/۸۶	۰/۵۳	✓
۵	۱۲	۱۲۰	۱۱۰	۱۰	۹	۰/۵۱۸	۰/۷۹۷	۰/۹۶	۰/۴۳	✓
۶	۸	۱۵۰	۱۲۰	۳۰	۱۳	۰/۳	۰/۷۵۰	۰/۸۸	۰/۴۴	✓
۷	۱۷	۱۲۰	۱۳۰	۱۰	۵	۰/۳۵۲	۰/۴۴	۰/۸۷	۰/۳۳۴	✓
۸	۱	۱۴۵	۱۰۰	۴۵	۱۹	۱	۰/۳	۰/۲۴	۰/۶۷۷	✓
۹	۱۵	۱۶۰	۱۳۰	۳۰	۶	۰/۱۸۳	۰/۴۵۸	۰/۸۵۵	۰/۳۶۲	✓
۱۰	۱۴	۱۱۰	۹۰	۲۰	۸	۰/۲۵	۰/۳۳۹	۰/۵۶۵	۰/۳۸۶	✓
۱۱	۱۴	۹۵	۱۲۵	۳۰	۷	۰/۴	۰/۵۸۹	۰/۹۷۸	۰/۰۴	✓
۱۲	۱۵	۱۰۰	۱۶۰	۶۰	۶	۰/۳۵۴	۰/۷۸	۰/۵۷۶	۰/۵۴	✓

۴. 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).
- Björk, 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-Kräik, 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.
- Venkataraman, 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*, 17(2): 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.
- Yalçinkaya, 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.