پیاده‌سازی کنترل نظارتی یک ایستگاه راه آهن به منظور تامین و تایید ایمنی و عدم برخورد قطارها

بهمن قربانی واقعی(نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

وحیده نصر، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

E-mail: bahman_gh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۶

چکیده

در این مقاله، مدلسازی یک ایستگاه بوسیله شبکه‌های پتری به منظور اعمال کنترل نظارتی ارائه گردیده است. در این راستا، یک نمایش یکپارچه از شبکه‌های راه‌آهن که شامل خط، سوزن و ایستگاه است، ارائه شده است. قطارهای عادی و سریع‌السیر در مدل در نظر گرفته شده در دو جهت حرکت می‌کنند. مدت زمان سیر بلاک با توجه به طول بلاک، سرعت و شتاب حرکت قطارها و با فرض شیب صفر درهزار استخراج شده است. برای مدلسازی ایستگاه مورد نظر، تعداد بلاک‌ها متناسب با تعداد سوزن‌ها، سکوی اصلی ایستگاه، مسیرهای کنارگذر و مسیرهای ورود به ایستگاه در نظر گرفته شده است. سپس هر بلاک در شبکه پتری معادل با یک مکان در نظر گرفته می‌شود. این مکان‌ها بوسیله کمان‌هایی به گذرها، مرتبط اند، به طوری‌که، کمان‌ها نشان‌دهنده جهت جریان ترافیک و گذرها نماینده وضعیت اشغال بلاک‌ها توسط قطار در هر لحظه هستند. یکی از الزامات بهره‌برداری خط، عدم برخورد با قطار روبه‌رو است. در این راستا، حالات غیرقانونی مربوط به حرکت قطارها برای شبکه معرفی شده است و با کنترل نظارتی‌های مربوطه این حالات از شبکه حذف گردیده‌اند. هم‌چنین به منظور کنترل زمانی قطارها در هنگام عبور چندین کنترل نظارتی دیگر نیز طراحی و مدل زمانبندی یک ایستگاه ارائه شده است. در نهایت با ایجاد حفره‌های زمانی در هنگام سبقت قطار سریع‌السیر از قطار نرمال در شبکه، نشان داده می‌شود که می‌توان به مجموعه برنامه زمانبندی قابل تحقق با در نظر گرفتن ملاحظات عملی سیگنالینگ دست یافت.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی گسسته رویداد، کنترل نظارتی، تحلیل ایمنی و عدم وقفه قطارها.

۱. مقدمه

امروزه برآوردن الزامات ایمنی در سیگنالینگ با افزایش سرعت قطارها و بالا رفتن ظرفیت شبکه سیستم راه‌آهن به عنوان ارائه‌دهنده خدمات بزرگ برای حمل و نقل مسافر و کالا، اهمیت قابل توجهی در بسیاری از کشورها دارد. زیرا خرابی آنها منجر به تصادف، تلفات انسانی و مالی خواهد شد. از مشکلات مطرح شده در صورت عدم ایمن بودن سیستم سیگنالینگ می‌توان به برخورد قطارها اشاره نمود. در راستای حل این مشکل احتیاج به مدلسازی و کنترل نظارتی حرکت قطار در خط است. با توجه به اینکه سیستم ریلی یک سیستم ترکیب دینامیکی تصادفی مبتنی بر زمان- محور و رویداد- محور است، بنابراین سیستم‌های ریلی با مدل‌های گسسته پیشامد مدلسازی شده‌اند و برای این منظور از روش‌های صوری استفاده می‌شود [Durmus, 2010]. استاندارد EN50128 از جمله استانداردهای مطرح در حوزه سیگنالینگ و به‌طور خاص در حوزه نرم افزار است. این استاندارد در حوزه مدل سازی، شبکه پتری زمانی را در سطح بالا معرفی و بسیار توصیه می‌کند. همچنین هدف از مدل کردن سیستم ریلی به‌وسیله شبکه پتری زمانی، مدل کردن رفتار سیستم به منظور تحلیل و تضمین ایمنی معرفی کرده است. تحقیقات فراوانی در زمینه مدلسازی سیستم‌های حمل و نقل ریلی با استفاده از شبکه‌های پتری صورت پذیرفته و بسیاری از آنها هم اکنون در صنعت ریلی به بهره برداری رسیده است. از جمله موارد مطرح شده در صنعت می‌توان به پروژه ملی آزمایشگاه تست سیستم اینترلاکینگ ترکیه با هدف بررسی و تصدیق عملکردی سخت افزاری و نرم افزاری الگوریتم‌های بردهای کنترلی و ماژول اینترلاکینگ و تضمین ایمنی آنها اشاره کرد [Seçkin, 2013] مرجع [Fanti, 2006] برای مدل‌سازی و کنترل سیگنال‌های ترافیکی از شبکه‌های پتری استفاده کرده است. در مرجع [Guia, 2008] از شبکه‌های پتری رنگی به منظور مدلسازی یک سیستم ریلی خط بسته استفاده کرده است، و در نهایت با استفاده از کنترل نظارتی لحاظ شده بر روی آن ایمنی و عدم وقفه در این شبکه بررسی می‌شود. مفاهیم پایه شبکه های پتری مانند گذر، مکان، کمان و نشانه‌گذاری در مرجع [Hei,, 2008] بصورت مدون تنظیم شده و این شبکه‌ها را به صورت گرافیکی و صوری تعریف کرده است که در سایر مراجع از روش ارائه شده در این مرجع برای بیان شبکه‌های پتری استفاده شده است. اما در هیچ کدام از مقاله‌های عنوان شده به بحث زمانبندی در هنگام سبقت پرداخته نشده است.

در مرجع [Moen, 2004] نحوه ترسیم درخت دسترس پذیری و فضای حالت برای شبکه های پتری بیان شده است که به کمک درخت دسترس‌پذیری می‌توان الگوریتم اجرای شبکه‌های پتری را پیاده‌سازی کرد. همچنین در مرجع [Ren, 1995] مفهوم قابل تحقق بودن عملیات راه‌آهن مانند برخورد و سبقت را ارائه داده که در آن عنوان شده است که یک برنامه باید تحت شرایط یاد شده بسیار خوب طراحی شده باشد تا مطمئن شویم که هیچ‌گونه برخوردی صورت نمی‌گیرد. تولید و تایید برنامه‌ریزی بسیار دشوار است و حتی اگر چنین برنامه‌ای تولید شده باشد، یک تغییر بسیار کوچک (به عنوان مثال یک تغییر برنامه فقط مربوط به زمان ورود و خروج یک قطار باشد) باعث توقف کل برنامه خواهد شد. بنابراین، یک رویکرد سیستماتیک به منظور کمک به طراحان در راستای طراحی برنامه زمان‌بندی قوی باید توسعه یابد.

از طرفی، وقفه در یک سیستم کنترلی زمانی اتفاق می‌افتد که دو یا چند ماموریت، منتظر یکدیگر هستند تا به صورت زنجیروار از منبع استفاده کنند. در ترافیک، وقفه حالتی است که تعدادی از قطارها نمی‌توانند مسیرشان را ادامه دهند، زیرا مسیر هر قطار به وسیله قطار دیگر مسدود شده است. مسئله وقفه به طور کامل بستگی به سرعت و زمان المان های سیستم ریلی مانند زمان ارسال پیام از راهبر به اتاق اینترلاکینگ، زمان روشن و یا خاموش شدن چراغ سیگنال‌ها، زمان اعزام، ورود و توقف

قطارها در ایستگاه و ... دارد و می توان با کنترل سرعت و زمان قطارها برای طی مسیر از وقفه جلوگیری کرد [John, 2011].

اولین مقاله در مورد عدم برخورد در سیستم‌های حمل و نقل در پایان‌نامه دکترای [Havender,1968] منتشر شده است که در مورد مشکلات عمومی اتوماسیون در سیستم‌های حمل و نقل پرداخته است، اما به طور خاص بر روی ترافیک راه‌آهن متمرکز نیست. مرجع [Petersen, 1983] یکی از نخستین کارهای مربوط به مشکلات بن‌بست و عدم وقفه در کنترل ترافیک راه‌آهن است. ایده اولیه آن، ایجاد یک الگوریتم است که قابلیت پذیرش دو قطار در دو جهت مخالف در خطوط تک خطه را ارزیابی می‌کند. اما این روش به صورت صوری انجام نشده است. نویسندگان دیگر در مرجع [Yong, 2009] تائید کردند که الگوریتم پترسن و تیلور در مرجع [Petersen, 1983] با اطمینان خاطر از وقفه‌ها جلوگیری می‌کند، با این حال در موقعیت‌های خاص، قطار ممکن است عقب‌نشینی کند. محققان دیگر در [Min, 2012] سعی کردند که پیچیدگی اعزام را با الگوریتم فازی کاهش دهند، اما از آنجا که مسئله بن‌بست صرفا معین است و حل آن قوانین سیگنالینگ مشخص دارد و کاملا مساله غیرفازی است، رویکرد فازی برای این اهداف جوابگو نیست. برای کنترل ترافیک راه‌آهن، جلوگیری از بن بست و عدم وقفه، رویکرد زمانبندی مجدد پیشنهاد شده است که در سیستم‌های پیچیده، برنامه‌ریزی مجدد ممکن است یک کار غیرقابل قبول باشد[Xun, 2013]. از طرفی برای شبیه‌سازی سنکرون به منظور اجرای رویدادهای مشترک در یک بازه زمانی مشترک و همچنین برای کنترل ترافیک در شبکه راه‌آهن با عملکرد نامنظم این روش کارآمد نیست[Braaksma, 2008]. زیرا در یک شبکه راه‌آهن ممکن اغتشاشاتی از جنس زمان بوجود آید که سبب می‌شود حرکت قطارها مطابق با جدول زمانبندی انجام نشود. درصدی از این اغتشاشات زمانی با برنامه‌ریزی مجدد در تولرانس قابل قبول برنامه زمان بندی قابل حل است، اما اگر اغتشاشات زمانی گسترده و ناپایدار باشند آنگاه روش زمانبندی مجدد جوابگو نیست. در این شرایط ممکن است برنامه زمانبندی حرکت قطارها کاملا عوض گردد که از دید مهندسی راه‌آهن به عنوان عملکرد ناپایدار تلقی می‌گردد.

در این مقاله با استفاده از شبکه‌های پتری و نرم‌افزار CPN Tools به بررسی ایمنی و عدم برخورد قطارها در یک ایستگاه نمونه پرداخته شده است. در واقع با تعریف متغیر حالت براساس نوع قطار، سرعت و جهت حرکت قطار و ارسال اطلاعات مورد نظر از طریق کنترل نظارتی به واحد کنترل مرکزی (CTC) به بررسی و پایش حرکت قطار در طول حرکت در شبکه پرداخته شده است. بنابراین در راستای دستیابی به اهداف ایمنی، عملکرد کنترل نظارتی بر روی شبکه‌های ریلی در راستای بهینه‌سازی حرکت قطارها به منظور دست یافتن به یک سیستم ایمن و بدون وقفه بررسی می‌شود. برای مدلسازی شبکه ریلی ابتدا بلاک‌بندی مسیر و ایستگاه مشخص می‌شود و مطابق با بلاک‌بندی شبکه ریلی، مکان‌ها[1] در شبکه پتری مدل می‌شوند. برای اینکه وضعیت اشغال بلاک توسط قطارها در هر لحظه مدل شود، گذرها[2] در شبکه پتری مدل می‌گردند. نشانه‌ها[3] در شبکه پتری رنگی، نوع قطار سریع السیر و عادی و هم‌چنین زمان طی مسیر را مدل می‌کنند. مزیت روش پیشنهادی، شامل صوری بودن، عدم بازگشت به عقب و عدم نیاز به زمانبندی مجدد در سطح عملیاتی با تعریف حفره‌های زمانی و سادگی آن است.

برنامه‌ریزی تاکتیکی که شامل تخصیص منابع راه آهن است و به طور مختصر به معنای زمان ورود و خروج قطار در برخی از نقاط مهم در امتداد مسیرهای پیش‌رو است. این زمان‌ها در قالب جدول زمان‌بندی به منظور استفاده مشتریان و کارکنان منتشر شده است. برنامه‌ریزی عملیاتی که اغلب در یک زمان کوتاه‌تر انجام می‌شود و به تخصیص شکاف یا حافظه، مسیریابی و یا معرفی خدمات اضافی معرفی شده نظیر اعزام تیم نگهداری و تعمیرات، صحت عملکرد محافظ اتوماتیک قطار، توقف اضطراری قطار در

طول مسیر، در یک جدول زمانی موجود می‌پردازد. برنامه‌ریزی مجدد، اختلالاتی را اداره می‌کند که در شبکه راه‌آهن روی می‌دهد و به منظور عادی‌سازی روابط، بازگشت به شبکه اصلی و کنترل آن در زمان واقعی صورت می‌گیرد. در این مقاله، هدف ایجاد شبکه‌ای ایمن و عاری از هر گونه برخورد در ایستگاه ریلی با مدلسازی در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی و اعمال کنترل نظارتی در یک ایستگاه ریلی با حفظ جدول زمانبندی و در محدود تولرانس قابل قبول آن است.

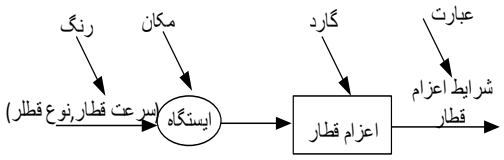
در این مقاله ابتدا به معرفی شبکه‌های پتری رنگی زمانی پرداخته می‌شود، سپس کنترل نظارتی و مفاهیم آن بیان می‌گردد. هم‌چنین مشخصات مسیر و مدت زمان سیر آن برای یک بلاک نمونه مدلسازی و ارائه گردیده است. در ادامه نیز طراحی و شبیه سازی یک ایستگاه با در نظر گرفتن سرفاصله زمانی مشخص، و الزامات بهره برداری به همراه نتایج آن ارائه شده است. در آخر مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار CPN Tools اجرا شده تا عملکرد صحیح کنترل نظارتی با در نظر گرفتن الزامات ایمنی و عملیاتی نشان داده شود. در نهایت نیز جمع‌بندی ارائه می‌گردد.

۲. معرفی شبکه‌های پتری رنگی زمانی

سیگنالینگ و مدیریت کنترل ترافیک در شبکه های راه آهن دارای ماهیت گسسته رویداد هستند. زیرا بسیاری از فرآیندهای شبکه ریلی به صورت رخداد آنی هستند، مانند اشغال شدن خط توسط قطار یا سبز شدن چراغ ترافیک. یک سیستم رویداد گسسته یک سیستم گسسته حالت و رویداد- محور است که تغییر حالت‌های یک مکان به وسیله یک دایره یا بیضی نمایش داده می‌شود و می‌تواند شامل صفر، یک یا چند نشانه از مجموعه رنگ باشد. به هر مکان از CPN یک مجموعه رنگ منتسب می‌شود که مشخص کننده نوع نشانه‌هایی است که آن مکان می‌تواند شامل شو [Ashki and Ghorbani, 2016]، رنگ‌ها معادل انواع آن به طور کلی به حوادث گسسته ناهمزمان یا رویدادهای گسسته در طول زمان بستگی دارد. بنابراین می‌توان نقاط زمانی مجزایی برای آنها متصور شد و متغیرهای حالت مربوطه را با توجه به طرح مدل تعریف کرد. بنابراین برای مدلسازی آن از شبکه‌های پتری که بر پایه اتوماتای حالت محدود بنا شده است، استفاده می‌گردد. شبکه‌های پتری ابزارهای قدرتمندی برای آنالیز و کنترل سیستمهای توزیعی و همزمان هستند که اغلب در برنامه‌های کاربردی راه‌آهن مانند برنامه‌ریزی استفاده می‌شود[Abbasi, 2013]. بعضی از مزایای شبکه پتری در مدل کردن سیستم‌های رویداد گسسته شامل نمایش گرافیکی، پایه ریاضیات قوی آن، موجود بودن ابزارهای شبیه‌سازی و آنالیز و کنترل آن است. ساختار شبکه‌های پتری یک ۵ تایی $C=(P,T,I,O,m_0)$ است. این شبکه از مجموعه‌ای ازمکان‌ها که با P و مجموعه ای از گذرها که با T نمایش می‌دهند، تشکیل شده است. مکان‌ها، نمایانگر وضعیت‌های ممکن سیستم هستند. هر مکان می‌تواند شامل تعدادی نشانه باشد. نشانه‌ها بیان می‌کنند که سیستم یا بخشی از آن در زمان جاری در چه وضعیتی ممکن است قرار داشته باشند. گذارها فعالیت‌های سیستم را نشان می‌دهند. توابع ورودی I و توابع خروجی O رابطه محل‌ها و گذرها را مشخص می‌کند[Cassandras, 2009].

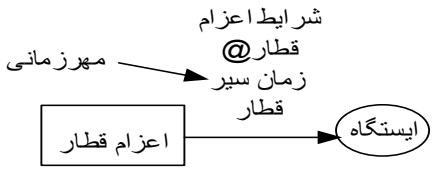
شبکه‌های پتری رنگی توسط کورت جانسون[۴] به عنوان یک مدل توسعه یافته از شبکه‌های پتری معرفی شده است. علاوه بر مکان‌ها، انتقال‌ها و نشانه‌ها در این شبکه رنگ[۵]، گارد[۶] و عبارت[۷] معرفی می‌شوند. مقادیر داده‌ای در این شبکه‌ها توسط نشانه‌ها حمل می‌شوند.

داده در زبان‌های برنامه‌نویسی و نشانه‌های رنگی نمایانگر مقادیر مجاز از هر نوع داده یا به عبارتی نمونه‌ای از یک نوع داده هستند. شکل ۱ مفاهیم معرفی شده در پتری رنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مفاهیم رنگ،گارد و عبارت در شبکه‌های پتری

یکی از مفاهیمی که در ارزیابی صفت کارآیی باید مورد توجه قرار گیرد، بحث زمان است. علاوه بر اینکه می‌توان به هر نشانه، مقداری منتسب کرد، می‌توان به هر نشانه مقدار زمانی داد. به این مقدار زمانی مهرزمانی[8] گفته می‌شود. مهرزمانی بیانگر اولین زمان مدل است که در آن نشانه می‌تواند استفاده شود. در واقع، ایجاد یک چارچوب برای مدل‌های رویداد گسسته زمانی ما را قادر خواهد ساخت به سوالاتی مانند " چه تعداد رویداد از یک نوع خاص در یک بازه زمانی داده شده می‌توانند اتفاق بیفتند؟"،" چه مدت زمان، سیستم در حالت داده شده باقی می‌ماند؟" و... پاسخ دهیم. این مسائل از اهمیت حیاتی در تجزیه و رفتار بسیاری از کلاس‌های رویداد گسسته برخوردارند. زمانی که نشانه‌ها در مکان‌های ورودی یک انتقال موجود هستند، گارد مربوط به انتقال برقرار است. در این حالت، انتقال مورد نظر فعال می‌شود. اما برای آنکه این انتقال بتواند آتش شود لازم است که در حالت آماده باشد. زمانی، انتقال در حالت آماده است که نشانه‌های مکان‌های ورودی انتقال کوچکتر و یا مساوی با زمان فعلی باشد. شکل ۲ زمان‌های انتقال را به طور جدگانه بر روی کمان و گذر نشان می‌دهد.



شکل۲. مفهوم زمان در شبکه پتری

۳. کنترل نظارتی

تئوری کنترل نظارتی که اولین بار بوسیله‌ی ونهام و روماژ معرفی شده‌اند[Guia, 2008]، بر پایه ماشین حالت محدود[9] بنا شده است. یکی از ویژگی‌های رفتاری سیستم‌های تحت نظارت خاصیت غیرمسدود شدن آن است، به طوری‌که از هر شرایط اولیه قابل دسترس می‌توان به حالت مطلوب و مورد نظر خود رسید.

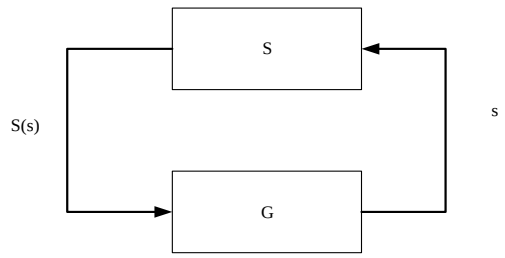
فرض کنید برای یک سیستم رویداد گسسته مدلسازی انتزاعی غیرزمانی یا سطح منطقی[10] ارائه شده است، که رفتار آن به منظور رسیدن به مجموعه‌ای از مشخصات داده شده بوسیله فیدبک کنترل باید ویرایش شوند. در این راستا، سیستم رویداد گسسته داده شده بوسیله اتوماتای G مطابق شکل ۳ مدل شده است که رفتار کنترل نشده سیستم گسسته را مدل می‌کند. همچنین مجموعه E به عنوان مجموعه‌ای از وقایع قابل تحقق برای اتوماتای G به عنوان مجموعه رویدادها تعریف می شود. فرض بر این است که رفتار سیستم رضایت‌بخش نیست و باید با کنترل کردن سیستم ویرایش شوند. به منظور تغییر دادن رفتار G، کنترل نظارتی بر روی آن تعریف می‌شود که با S نشان می‌دهند[Durmuş, 2010].

یک سیستم رویداد گسسته G مدل شده بوسیله‌ی دو زبان L و L_m را در نظر بگیرید که L مجموعه‌ی تمام رشته‌هایی است که سیستم رویداد گسسته می‌تواند تولید کند. $L_m \subseteq L$ زبان رشته‌های نشان‌دار شده است که برای نشان‌دادن پایان بعضی از وظایف و رسیدن به حالت مطلوب استفاده می‌شود. مطابق با شکل ۳، کنترل نظارتی S به منظور تعامل با G در حالت فیدبک به آن اضافه شده است. در این قسمت E به دو زیرمجموعه مجزا تقسیم شده است:

$$E = E_C \cup E_{UC} \qquad (۱)$$

E_C مجموعه رویدادهای کنترل‌پذیر است و بوسیله کنترل نظارتی S می‌توانند غیرفعال شوند. E_{UC} نیز مجموعه رویدادهای غیرقابل

کنترل است که با کنترل نظارتی S نمی‌توان از وقوع آن جلوگیری کرد.



شکل ۳ . حلقه فیدبک کنترل نظارتی با G نشان‌داده شده در سیستم

در سیستم رویداد گسسته G، از دیدگاه تقسیم بندی E به دو بخش کنترل پذیر و غیرقابل‌کنترل‌پذیر، کنترل نظارتی S در شکل ۳ قابل تحقق است اگر برای همه رویدادهای $s \in L(G)$ وجود داشته باشد:

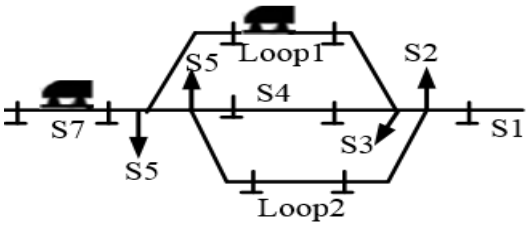
$$E_{uc} \cap \Gamma(f(x_0, s)) \subseteq S(s) \qquad (۲)$$

رابطه ۲ به این معناست که S اجازه ندارد که رویدادهای غیرقابل کنترل تحقق پذیر را غیرفعال کند. زیرا کنترل نظارتی نمی‌تواند مانع از اتفاق افتادن وقایع غیرقابل کنترل شود. اما اگر این رویداد غیرقابل کنترل خطرناک باشد از طریق کنترل کردن رویداد قابل کنترل که قبل از آن اتفاق می‌افتد می‌تواند مانع از رخ دادن آن شود و آن حالات را حذف کند. به عنوان مثال با تغییر دادن جهت حرکت سوزن به عنوان یک عمل کنترل‌پذیر مانع از برخورد دو قطار در ادامه مسیر دو قطار شد. در این مقاله، با فرض رویت پذیری و کنترل پذیری رویدادها به دنبال رشته‌هایی هستیم که الزام خواسته شده را برآورده و عملیات کنترل نظارتی عدم برخورد قطار با فرض داشتن آن خواص پیاده‌سازی شود. در واقع در عمل با استفاده از مدارات راه، سیگنال‌ها و سوزن‌ها این کنترل پذیری و رویت‌پذیری میسر می‌شود.

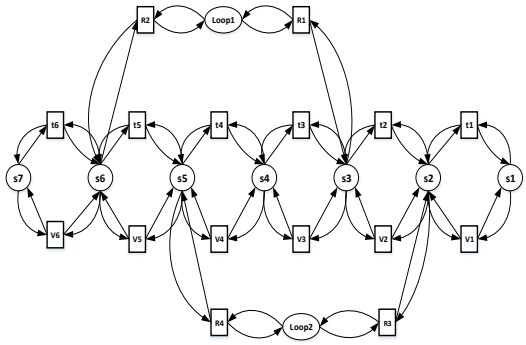
٤. مدلسازی ایستگاه ریلی با استفاده از شبکه پتری رنگی زمانی

با توجه به قوانین سیر و حرکت و به منظور داشتن ایمنی کافی، قطارها با یک فاصله مشخص اعزام می‌شوند. به این ترتیب که هر مسیر به بخش‌هایی به نام بلاک تقسیم شده و در هر زمان فقط یک قطار می‌تواند در هر بلاک وجود داشته باشد. در این مقاله، فاصله بین دو ایستگاه را یک بلاک فرض می‌کنیم. در یک سیستم بلاک ثابت، یک بلاک قسمتی از خط است که بین دو سیگنال قرارگرفته است، سیگنال‌ها ترافیک قطار را کنترل و شرایط ایمن را بر سیستم اعمال می‌کنند. در این بخش تعاریف اساسی از شبکه پتری رنگی زمانی(TCPN[۱۱]) و ایمنی سیستم‌های راه‌آهن ارائه می‌شود. از TCPN برای مدلسازی سیستم ریلی استفاده شده است و روش مدلسازی با یک مثال نشان داده می‌شود. شبکه پتری رنگی زمانی (TCPN) توسعه یافته‌ی شبکه پتری(PN) است که در آن مفاهیم رنگ و زمان به توکن‌ها اختصاص داده شده است.

در یک شبکه پتری رنگی زمانی برای یک سیستم ریلی، یک مکان نشان دهنده منابع ریلی شامل ایستگاه، بلاک یا سوزن، مدار راه و هر فرمان شامل کنترل مسیر است. یک گذار نشان دهنده وارد شدن به یا خارج شدن از یک مکان و یک توکن نیز نماینده‌ی یک قطار است. رنگ توکن بیانگر نوع خاصی از قطار است به طوری‌که هر رنگ متعلق به یک قطار است. در این مقاله قطار سریع‌السیر و عادی مد نظر است. یک کمان جهتدار معمولا یک مکان را به یک گذر یا یک گذر را به یک مکان متصل می‌کند که نشان دهنده جهت جریان ترافیک است. رنگ‌های احتمالی گذارها و مکان‌ها، مسیر قطار بر روی مکان‌های شبکه را تعریف می‌کنند. شکل ٤، مدل در نظر گرفته شده شبکه ریلی شامل یک ایستگاه و شکل ۵ مدل پتری شبکه ریلی نشان داده شده در شکل ٤ است[Wang, 2016].



شکل ٤ . مدل ایستگاه در نظر گرفته شده



شکل ٥ . مدل پتری یک ایستگاه

در این مقاله فرض می‌شود که قطارها بجز در مکان‌های کنارگذر شامل "Loop1,Loop2 " در دو جهت حرکت می‌کنند. S4 بلاک ایستگاه، S2,S3,S5,S6 بلاک‌های سوزن و S1 و S7 بلاک‌های مسیر قبل و بعد ایستگاه هستند. در مرجع [Wang, 2016]، فاصله بین دو ایستگاه برابر با ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل ٦ فرض می‌کنیم قطاری از ایستگاه A شروع به حرکت کرده و پس از عبور از ایستگاه B به مسیر خود ادامه دهد. اگر حداکثر سرعت سیر قطار در طول بلاک km/h ۱٤۰ و سرعت عبوری از سوزن‌های ایستگاه ۸۰km/h باشد، آنگاه داریم:

x_1 و t_1 : به ترتیب مسافت و زمان لازم برای رسیدن سرعت قطار به ۱٤۰ km/h

X_2 و t_2 : به ترتیب مسافت و زمان حرکت قطار با سرعت ۱٤۰ km/h

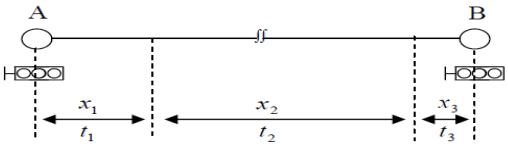
X_3 و t_3 : به ترتیب مسافت و زمانی که قطار از ۱٤۰ km/h به ۸۰ km/h تقلیل سرعت می‌دهد.

با فرض شیب صفر در هزار، شتاب افزایش سرعت m/s^2 ۰/۳ و با توجه به اینکه حداکثر شتاب ترمز سرویس طبق توصیه UIC، $m/s^2$۰/۸۵ است، مقادیر پارامترهای فوق به صورت زیر خواهد بود:

$$x_1 = 2.52km \quad t_1 = 130s$$

$$x_2 = 26/88km \quad t_2 = 691.2s$$

$$x_3 = 600m \quad t_3 = 19.6s$$



شکل ٦. زمان‌بندی سیر قطار در بلاک AB به طول ۳۰ km

مطالب ذکر شده در سناریوی شبیه سازی برگرفته از اطلاعات زمانی و سرعت قطارها در مسیر تهران-مشهد است که با توجه به سرعت حرکت قطارها و موقعیت خط مدت زمان سیر حرکت قطارها محاسبه گردیده است. البته از اطلاعات فوق به منظور بدست آوردن بازه‌ی زمانی برای طی کردن هر بلاک استفاده شده است که برای ایستگاه‌های دیگر ممکن است متفاوت باشد اما در روند شبیه‌سازی مشکلی بوجود نمی‌آورد و راهکار به صورت کلی ارائه شده است. در این مقاله، اینترلاکینگ طراحی شده محدودیت‌های زیر را داراست:

- لکوموتیوران همیشه از سیگنال و محدودیت‌های سرعت آن اطاعت می‌کنند.
- قطارها یا به سمت راست و یا به سمت چپ حرکت می‌کنند و نمی‌توانند همزمان در دو جهت حرکت کنند. در واقع حرکت رو به عقب ندارند.
- شرایط خطا عناصر سیستم سیگنالینگ نادیده گرفته می‌شوند.

- برای هر قطار، سه ویژگی نوع قطار، زمان حرکت و جهت حرکت فرض می‌شود که در اینترلاکینگ معلوم فرض شده است.

به طور رسمی یک TCPN ظرفیت محدود به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$TCPN = (P, T, A, E, w, l, x_{\circ}, V) \qquad (۳)$$

که $P = \{p1, p2, . . . , pm\}$ ، یک مجموعه محدود از مکان‌ها و m>0، $T = \{t_1, t_2, . . . , t_n\}$، یک مجموعه محدود از گذرها و n>0، $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ یک تابع که شامل مجموعه کمان‌های نشان‌دار از P به T و بالعکس است. در مدل گسترش یافته‌ی PN، توکن‌ها دارای یک مقدار هستند که اغلب به عنوان رنگ معرفی می‌شوند. دلایل متنوعی برای تعریف چنین فرمتی وجود دارد. یکی از این دلایل این است که پتری معمولی تمایل زیادی به بزرگ شدن دارند تا اداره شوند. دلایل دیگر این است که در واقع توکن‌ها نشان‌دهنده‌ی هدف‌ها یا منابع در سیستم مدل‌شده است. به نحوی که این اهداف ممکن است دارای چندین مشخصه باشند، که به سادگی با توکن‌های پتری ساده نمایش داده نمی‌شوند [Wang, 2016].

ویژگی‌های توکن‌های معرفی شده در شبکه را با مجموعه $E = \{\langle n_i, v_i, t_i \rangle \middle| n_i \in N \wedge v_i \in A(n_i) \wedge t_i \in \{0,1,2\}\}$ نشان می‌دهیم. چندتایی $\langle n_i, v_i, t_i \rangle$ نشان دهنده‌ی توکن با زمان نگهدارنده‌ی n_i با رنگ v_i وجهت حرکت t_i است. در اینجا n_i از فرمول (٤) بدست می‌آید:

$$n_i = \frac{\text{سرعت لحظه‌ای قطار } i}{\text{طول مسیر بلاک}} \qquad (٤)$$

هم‌چنین اگر t =1 باشد، جهت حرکت از راست به چپ و اگر t =2 باشد، جهت حرکت معکوس است. و v_i هم بیانگر نوع قطار است. $w: P \rightarrow N$ تابع ظرفیت وابسته به هر مکان در P است. N مجموعه اعداد صحیح غیرمنفی و l تابع انتقال نامگذاری شده است، بطوری‌که داریم:

$$\begin{aligned} & l: T \rightarrow E \\ & X = \{p_1, ..., p_6\} \\ & f(x,e) = \begin{cases} x+1 & if\ t=1 \\ x-1 & if\ t=2 \end{cases} \end{aligned} \qquad (۵)$$

$x_{\circ} \in N^n$ حالت اولیه شبکه و $V = \{v_j : t_j \in T_D\}$ ساختار پالس است[۲۹]. TCPN نشان‌دار بیان‌کننده‌ی حالات شبکه است و به وسیله توزیع فشرده‌ای از توکن‌ها در مکان‌های شبکه، نشان داده می‌شود. زمان نگه‌دارنده n_i نشان‌دهنده مدت زمانی است که یک توکن با رنگ v_i باید در مکان p_i بگذراند. یک نشانه در دسترس پذیر گفته می‌شود اگر زمان نگه‌دارنده‌ی آن سپری شده باشد. زمان نگه‌دارنده به زمان‌های فعالیت عملکردهای مدل شده بوسیله‌ی توکن‌های رنگی در مکان‌هایی مانند زمان حرکت بین بلاک‌ها[۱۲] یا زمان دوئل[۱۳] قطار وابسته است در حالیکه گذارها به وقایعی مرتبط است که بلافاصله بعد از آن اتفاق می‌افتد مانند اعزام یا رسیدن قطارها.

قوانین و الزامات بهره‌برداری که شامل یک الزام مربوط به ایمنی و سه الزام مربوط به شرایط بهره‌برداری خط است، به صورت زیر است:

الزام ایمنی: الزام ایمنی بیان می‌دارد که در هر کدام از بلاک‌ها می‌بایست یک قطار حضور داشته باشد و یا قطاری در بلاک نباشد. این الزام شرایط بهره برداری بدون تصادم و برخورد را در خط برقرار می‌کند.

الزام عملیاتی دو (عدم وقفه): این الزام بیان می‌دارد که شبکه ریلی بدون وقفه به کار خود ادامه دهد. به عبارت دیگر به دلیل شرایط خط، قطار توقف نداشته باشد.

الزام عملیاتی سه: این الزام بیان می‌کند که قطار عادی نباید در حلقه کنارگذر متوقف شود. حلقه کنارگذر فقط برای توقف موقتی در نظر گرفته شده و شرایط عدم برخورد را برای قطار سریع‌السیر فراهم می‌آورد. بدیهی است که پس از اتمام فرآیند عدم برخورد، قطار عادی باید از حلقه کنارگذر خارج شده و به

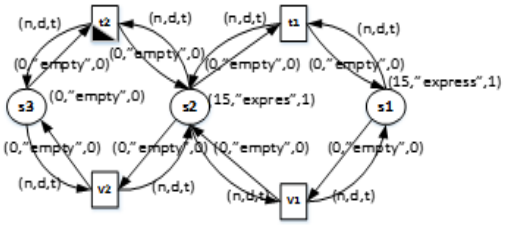
مسیر اصلی برگردد. به عبارت دیگر قطار عادی نباید در حلقه کنارگذر برای همیشه به تله افتد.

٤-١ مدلسازی الزام ایمنی

الزام ایمنی از برخورد قطارها در خط جلوگیری می‌کند. برای برقراری الزام ایمنی، مکان‌ها در شبکه پتری مدل شده باید شامل یکی از نشانه‌های خالی، عادی و یا سریع‌السیر باشند. به عبارت دیگر در شبکه پتری، مکان‌ها باید شامل یکی از نشانه‌های {(n,d,t),(0,empty,0)} باشند. n زمان حرکت قطارها و d نوع قطار و t جهت حرکت قطار است و (0,empty,0) به معنی عدم وجود قطار در مکان مورد نظر است.

پس از توالی شلیک گذرها، با توجه به جهت کمان‌های اتصالی، با هر شلیک، نشانه‌ها به گونه‌ای جابجا می‌شوند که در هر مکان فقط یک نشانه باشد و این چنین الزام ایمنی در شبکه برآورده می‌شود.

به طور مثال در شکل ۷ که بخشی از شکل ۵ است، مکان‌های S1 و S2 با دو قطار سریع‌السیر (15,"express",1) با جهت حرکت راست به چپ و زمان عبور از بلاک ۱۵ دقیقه اشغال شده است، قطاری که در مکان S1 قرار دارد، اجازه حرکت ندارد. چون بلاک S2 توسط یک قطار اشغال شده است. اما قطاری که در S2 قرار دارد به علت خالی بودن بلاک روبه‌روی آن S3، اجازه حرکت دارد که با مثلث کوچکی در پایین گذر t2 نشان داده شده است. پس از شلیک شدن گذر t2، با در نظر گرفتن زمان اجرای برنامه، قطار واقع در مکان S1 اجازه حرکت دارد.



شکل ۷ . مدلسازی الزام ایمنی

٤-٢ طراحی کنترل نظارتی به منظورمدلسازی عدم برخورد

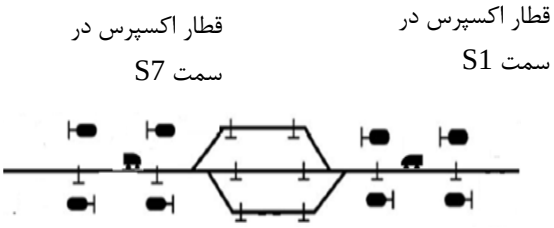
در صنعت ریلی، سسیستم‌های نظارتی از طریق متمرکز کردن عملیات کنترل و نظارت به ساماندهی عملیات سوئیچینگ در سیگنال ها و سوزنهای موجود در خطوط ریلی می‌پردازند. مراکز نظارت و کنترل بر عملیات ریلی به صورت یکپارچه و براساس شبکه‌ای از سیستم‌های کامپیوتری طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند که وظیفه حفاظت از ایمنی عملیات سیر و اعزام قطارها را بر عهده دارند.

فرآیندهای مهم عملیات نظیر اعزام تیم نگهداری و تعمیرات، صحت عملکرد محافظ اتوماتیک قطار، توقف اضطراری قطار در طول مسیر یا در امتداد سکوی مسافری، تخلیه مسافران در مواقع اضطراری، خطوط ریلی را به خوبی مدیریت می‌کند.

در این بخش ما دو حالت مختلف ورود قطار به ایستگاه با سرعت‌های مختلف را بررسی می‌کنیم. در حالت اول دو قطار با سرعت‌های برابر و برخلاف یکدیگر وارد یک ایستگاه می‌شوند، در حالت دوم دو قطار با سرعت‌های نابرابر وارد یک ایستگاه می‌شوند. در ادامه به شبیه‌سازی هر مورد با استفاده از نرم‌افزار CPN TOOLS می‌پردازیم.

٤-٢-١ ورود و اعزام قطارهای اکسپرس با سرعت یکسان

در این قسمت فرض می‌شود یک قطار در یک جهت وارد ایستگاه شود و قطار دیگر در جهت مخالف با سرعت برابر از ایستگاه فرعی اعزام گردد یا در مسیر ورود به ایستگاه باشد. با توجه به شکل ۸، فرض می‌کنیم که دو قطار با سرعت‌های برابر در مکان S1 و S7 با توکن‌های (15,"express",1) و (15,"express",2) وجود داشته باشند. مطابق با شکل ۹، مکان‌های اولیه هر یک از قطارها در نرم‌افزار تعریف شده است.



شکل ۸ . مدلسازی الزام ایمنی

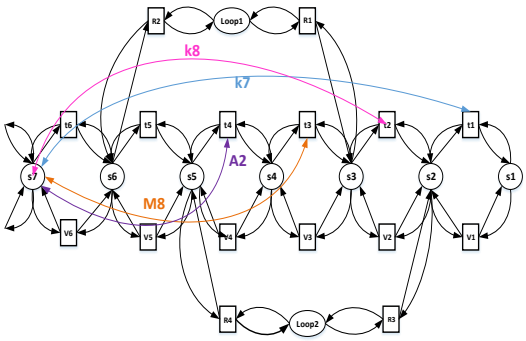
```
1 @ 0:
TimedProtocol's1 1: 1`(15,"express",1)@0
TimedProtocol's2 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol's3 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol's4 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol's5 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol's6 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol's7 1: 1`(15,"normal",2)@0
TimedProtocol's8 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol'LOOP1 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol'LOOP2 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol'yard1 1: empty
TimedProtocol'yard 1: empty
```

شکل ۹. مکان اولیه دو قطار با سرعت برابر در نرم‌افزار

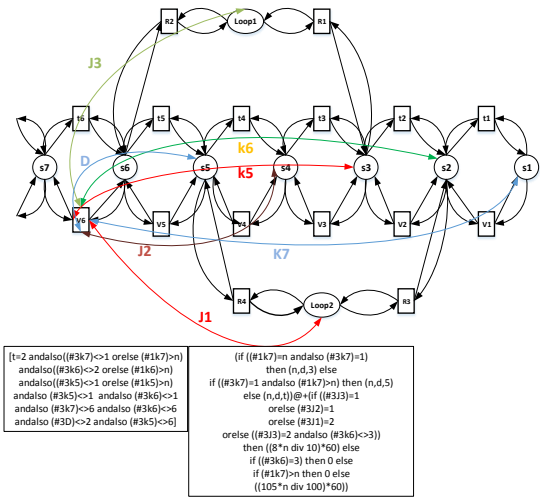
در این قسمت به منظور کنترل همزمان دو قطار که در یک زمان خاص وارد ایستگاه می‌شوند، باید مدل همزمانی حرکت قطارها را بر سیستم اعمال کنیم. فرض کنید که قطارها بدون اعمال کنترل نظارتی‌های مربوطه شروع به حرکت کنند. با شروع حرکت یکی از قطارها در بلاک مسیر بین دو ایستگاه، با توجه به زمان سیر حرکت آن، زمان ۹۰۰ ثانیه برای هر دو قطار در نظر گرفته می‌شود. چنانچه قطار دوم با شرایط مشابه حرکت کند، به زمان ۱۸۰۰ ثانیه برای هر دو قطار می‌رسیم. زیرا دو قطار در هنگام ورود به ایستگاه به منظور قرار گرفتن در جایگاه‌های خود از طریق کنترل نظارتی با یکدیگر تعامل دارند. از آنجا که یکی از کارهای کنترل نظارتی سنکرون‌سازی دو رویداد متفاوت است، با چنین مشکلی روبه‌رو می‌شویم. بنابراین برای حل این مشکل، کنترل نظارتی‌های مربوطه را در ادامه تعریف می‌کنیم. مطابق با شکل ۱۰، کنترل نظارتی k7 را بر روی گذر t1 طراحی و بر روی کمان خروجی گذر t1 نیز دستور زیر را لحاظ می‌کنیم.

(if ((#1k7) = n andalso (#3k7) = 2) then (n,d,3)) else (n,d,t)

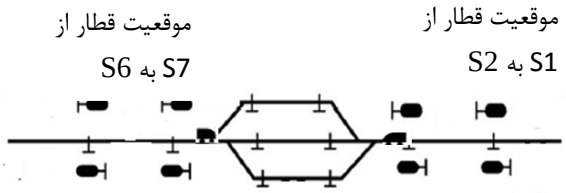
عبارت (#1k7) = n برابر بودن سرعت دو قطار و عبارت (#3k7) = 2 غیر هم جهت بودن دو قطار مذکور را بررسی می‌کند. در صورتی که هر دو شرط همزمان برقرار باشد. توکن واقع در مکان S1 در زمان ۹۰۰ ثانیه یا ۱۵ دقیقه که برای آن لحاظ شده است، با مقدار (15,"express",3) به مکان S2 منتقل می‌شود. قطار دیگر با مشخصات (15,"express",2) نیز از طریق کنترل نظارتی طراحی شده K6 مطابق با شکل ۱۱، بر روی گذر v6 با رویت کردن توکن (15,"express",3) در مکان S7 با دستور if ((#3k6)=3) then 0 و با مقدار زمانی صفر به مکان S6 منتقل می‌شود. در واقع با تغییر t = 3، این پیام به توکن مقابل رسانده می‌شود که مقدار زمان طی مسیر برای دو قطار یکسان است. به این طریق دو قطار در مدت زمان ۹۰۰ ثانیه به ایستگاه می‌رسند. شکل ۱۲، موقعیت قرار گرفتن دو قطار پس از اجرای الگوریتم ذکر شده و شکل۱۳، زمان‌های بدست‌آمده برای دو قطار مورد نظر در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. کنترل نظارتی‌های مربوط به فعال شدن گذرهای t1,t2 ,t3



شکل ۱۱. کنترل نظارتی‌های مربوط به فعال شدن گذر V6



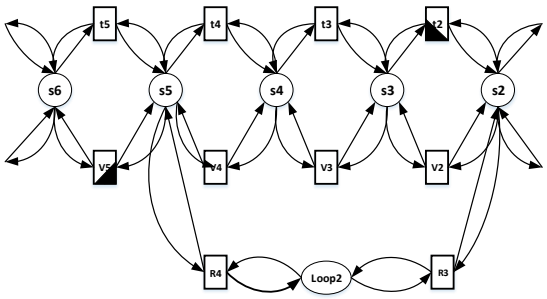
مدت زمان طی مسیر : 15 دقیقه

شکل ۱۲. طی مسیر دو قطار با سرعت‌های برابر

```
3 @ 900:
TimedProtocol's1 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol's2 1: 1`(15,"express",3)@900
TimedProtocol's3 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol's4 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol's5 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol's6 1: 1`(15,"normal",2)@900
TimedProtocol's7 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol's8 1: 1`(0,"empty",0)@0
TimedProtocol'LOOP1 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol'LOOP2 1: 1`(0,"empty",0)@900
TimedProtocol'yard1 1: empty
TimedProtocol'yard 1: empty
```

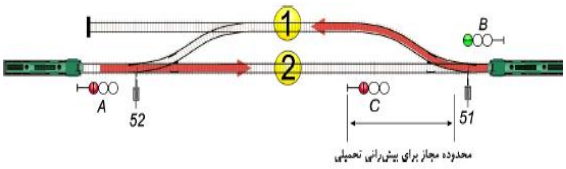
شکل ۱۳. مدل همزمانی طی مسیر توسط دو قطار یکسان در نرم‌افزار

در ادامه، منطق ورود قطارها به ایستگاه بررسی می‌شود. در اینجا، مطابق با شکل ۱٤ همزمان دو گذر t2 و v5 فعال هستند. نرم‌افزار در هر بار اجرای برنامه به طور تصادفی یکی از گره‌ها را فعال می‌کند که در هر دو صورت نتیجه این شبیه‌سازی یکسان می‌شود و به مکان S3 برای توکن (15,"express",1) و مکان S5 برای توکن (15,"express",2) می‌رسیم. دقت شود که در این مرحله مقدار t را برای توکن اول از ۳ به ۱ تغییر دادیم.



شکل ۱٤. فعال بودن همزمان دو گذر t2 و v5

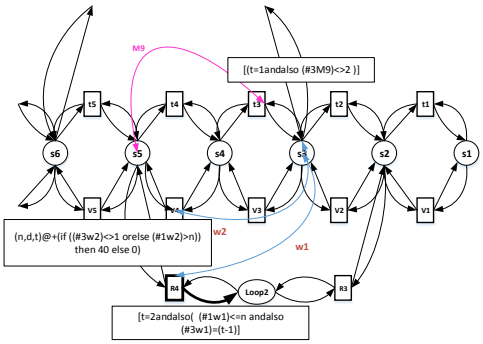
در این مرحله، می‌خواهیم نحوه ورود دو قطار به ایستگاه و نحوه قرارگیری آنها در جایگاه‌های خود را بررسی کنیم. طبق منطق اینترلاکینگ، مطابق با شکل ۱۵ هنگامی که مسیر قطار وارده بوسیله سیگنال B به خط ۱ (فرعی) تنظیم شده است (که متعاقب آن سوزن ۵۱ نیز قفل است). اگر قطار دیگری قصد ورود به ایستگاه بوسیله سیگنال A از جهت مخالف را داشته باشد، چون احتمال متوقف در پشت سیگنال C وجود دارد (محدوده خطر تا نقطه خطر را نتواند رعایت کند) احتمال سانحه جدید وجود خواهد داشت. بنابراین سیگنال‌های A و B بایستی با یکدیگر قفل شوند و اصطلاحا مسیر از A تا C داده نمی‌شود.



شکل ۱۵. منطق اینترلاکینگ در هنگام ورود قطارها به ایستگاه

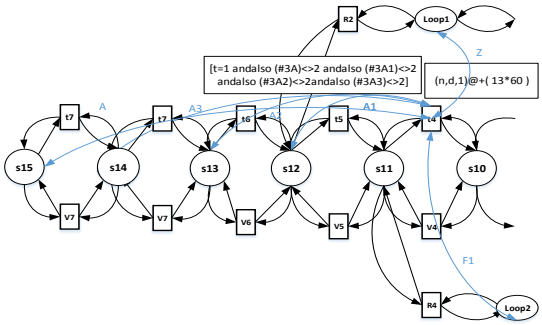
بنابراین اولویت حرکت را به قطاری که قرار است به مسیر کنارگذر هدایت شود، می‌دهیم. مطابق با شکل۱٦، کنترل نظارتی‌های w1 را بر روی گذر R4، M9 را بر روی گذرt3 و w2 بر روی گذر v4 اعمال می‌کنیم، که در نتیجه آن گذر t3 با دستور2<>(#3M9) غیرفعال، گذرw1 نیز با دستور درج شده

t =2 andalso(#1w1)<=n andalso (#3w1)=1) فعال و گذر v4 نیز با دستور (#3w2)<>1 غیرفعال می‌شود و قطار سریع‌السیر دارای t = 2 با مقدار (15,"express",4) به مسیر کنارگذر جنوبی منتقل می‌گردد. دقت شود که تغییر t = 4 در این حالت بدین معناست که هر دو قطار همزمان به ایستگاه رسیده‌اند. در مرحله بعد نیز گذر t3 فعال و بعد از مدت زمان ٦٠ ثانیه قطار دارای t = 1 به مکان S4 منتقل می‌شود.



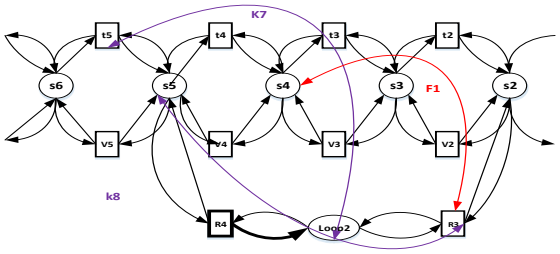
شکل ١٦. کنترل نظارتی‌های تعریف شده w1,M9 وw2

در این قسمت می‌خواهیم خروج همزمان دو قطار از ایستگاه را شبیه‌سازی کنیم. مطابق با شکل ١٧، کنترل نظارتی‌های تعریف شده A2,A1 و A3 بر روی گذر t4 با حفظ شرایط ایمنی، اجازه حرکت را به قطار واقع در مکان S4 پس از ١٣ دقیقه توقف، می‌دهد.



شکل ١٧. کنترل نظارتی‌های تعریف شده بر روی گذر t4

مطابق با شکل ١٨، قطار دوم از طریق کنترل نظارتی F1 نشان داده شده، با دستور t = 4 andalso (#3F1)<>1 مجوز حرکت ندارد. همچنین، قطار دوم از طریق کنترل نظارتی k8 تعریف شده با دستور t = 4 andalso(#3k8)<>1 مجددا اجازه حرکت ندارد، در حالیکه قطار اول به مکان S6 منتقل می‌شود. پس از آن قطار واقع در مکان S6 به منظور رعایت همزمانی خروج از ایستگاه از طریق کنترل نظارتی k7 دیگر که بر روی گذر R6 و مکان Loop2 تعریف شده، با دستور t =1 andalso (#3k8)<>4 متوقف می‌شود تا قطار دوم از مسیر کنارگذر با زمان صفر به مکان S2 منتقل شود و به این وسیله زمان یکسان درهنگام خروج از ایستگاه برای هر دو قطار لحاظ شود. با قرار گرفتن قطارها در مکان S2 و S7، حرکت قطارها از نظر زمانی مستقل می‌شوند و هر کدام مسیر مربوط به خود را ادامه می‌دهند. شکل ١٩ نیز گزارش تائید خروج دو قطار از ایستگاه با قرار گرفتن در مکان‌های S2 و S7 را با همراه زمان‌های مربوط به خود را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود دو قطار در این مرحله از نظر زمانی مستقل هستند و دو رویداد موازی را پیش می‌برند.



شکل ١٨. کنترل نظارتی‌های تعریف شده F1 و K8 بر روی گذرهای R3 و t5

```
12 @ 1810:
Timed Protocol's1 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol's2 1: 1`(15,"express",2)@1810
Timed Protocol's3 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol's4 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol's5 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol's6 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol's7 1: 1`(15,"express",1)@1870
Timed Protocol's8 1: 1`(0,"empty",0)@960
Timed Protocol'LOOP1 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol'LOOP2 1: 1`(0,"empty",0)@1810
Timed Protocol'yard1 1: empty
Timed Protocol'yard 1: empty
```

شکل ١٩. خروج همزمان دو قطار از ایستگاه

٤-٢-٢ ورود و اعزام دو قطار اکسپرس و نرمال با سرعت‌های متفاوت

در این قسمت فرض می شود که یک قطار در یک جهت وارد

ایستگاه شود و قطار دیگر در جهت مخالف با سرعت نابرابر از ایستگاه فرعی اعزام گردد یا در مسیر ورود به ایستگاه باشد. در این حالت فرض کنید که یک توکن با مقدار (15,"express",1) در مکان S1 و (18,"express",2) در مکان S7 وجود دارد. در این شرایط مطابق با زمان طی مسیر در نظر گرفته شده برای هر کدام، قطار سریع‌السیر به ایستگاه می‌رسد و پس از سه دقیقه متوقف شدن در سکو، قطار نرمال به ایستگاه می‌رسد. این شرایط با تغییر t به ٦ برای قطارهای با سرعت بیشتر سمت راست و t برابر با ٥ برای قطارهای با سرعت بیشتر سمت چپ به منظور شناسایی شرایط و نوع قطارها در هنگام ورود به ایستگاه، در نظر گرفته شده است. در ادامه مراحل شبیه‌سازی شرح داده می‌شود. در سه رویداد اول گذر v6 که متعلق به قطار نرمال است، غیرفعال است. چون یکی از ویژگی‌های کنترل نظارتی، همزمان‌سازی دو رویداد متفاوت است، بنابراین چنانچه قطار نرمال حرکت می‌کرد به زمان ۱۰۸۰ ثانیه یا ۱۸ دقیقه می‌رسیدیم که این زمان برای قطار سریع السیر نیز لحاظ می‌شد، در حالیکه هنوز در جایگاه S1 قرار داشت. این شرایط با واقعیت در تضاد است، زیرا در زمان ۹٦۰ ثانیه قطار سریع السیر به ایستگاه اصلی رسیده و در آنجا متوقف شده است. بنابراین برای حل این مشکل، ابتدا قطار سریع‌السیر را با مدت زمان صفر حرکت می‌دهیم تا به جایگاه S4 برسد. این روند به ترتیب از طریق کنترل نظارتی‌های k7، k6 و k5 تعریف شده در مراحل قبل بر روی گذر v6 مطابق با شکل ۱۱ و با دستورهای تعریف شده در این قسمت اجازه حرکت به قطار نرمال داده نمی‌شود، از طرفی کنترل نظارتی‌های k7,k8,M9 و A2 تعریف شده در شکل ۱۰ قطار سریع‌السیر را با مقدار زمانی صفر به جایگاه S4 منتقل می‌کند. دقت شود، مقدار t قطار سریع‌السیر از طریق کنترل نظارتی k7 تصویر شده در شکل ۹، از ۱ به ٦ با دستور زیر تغییر می‌کند.

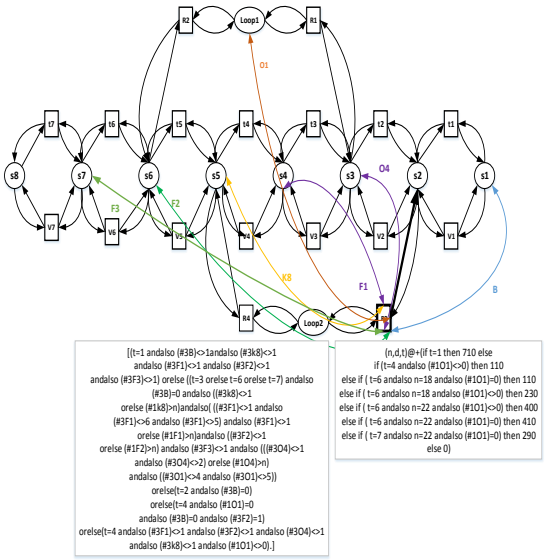
```
if((#3k7)=2 andalso  then (n,d,6) else (n,d,t)
(#1k7)>n
```

سپس در مرحله بعد، گذر v6 را فعال می‌کنیم تا با مدت زمان ۱۰۸۰ ثانیه به مکان S6 برسد. توجه شود که در این حالت گذر v6 از طریق کنترل نظارتی J2 تعریف شده در شکل ۱۰، مقدار t = 6 را درمکان S4 می‌خواند که با منطق کنترلی تعریف شده، بر روی کمان خروجی گذر، این پیام منتقل می‌شود که قطار سریع‌السیر به تازگی وارد ایستگاه شده است و قطار نرمال می‌تواند با سرعت عادی خود و بدون هیچ وقفه‌ای در شبکه حرکت کند. اگر مقدار خوانده شده برابر با t =1 باشد، در این صورت این پیام به قطار نرمال منتقل می‌شود که قطار سریع‌السیر بیشتر از مدت زمان در نظر گرفته شده در سکو متوقف شده است و به علت عدم آزاد بودن مسیر نمی‌تواند حرکت کند. بنابراین برای جلوگیری از وقفه بیشتر در شبکه، باید با سرعت بیشتر به حرکت خود ادامه دهد. در مرحله بعد قطار نرمال پس از طی مدت زمان ٦۰ ثانیه در مسیر کنارگذر جنوبی قرار می‌گیرد. زمان بدست آمده در این حالت، برابر با ۱۱٤۰ ثانیه است که برای قطار سریع‌السیر نیز لحاظ شده است و معادل با ۳ دقیقه توقف برای قطار سریع السیر در سکو است. با توجه به استدلال ذکر شده چون قطار نرمال تازه به ایستگاه رسیده است و باید پس از طی مدت زمان ۱۳ دقیقه حرکت کند و این زمان برای قطار سریع‌السیر نیز لحاظ می‌شود، بنابراین گذر R3 را غیرفعال می‌کنیم. گذر t4 نیز با توجه به اینکه سه دقیقه از مدت زمان توقف آن در ایستگاه گذشته است، با مدت زمان ۱۰ دقیقه یا ٦۰۰ ثانیه با استفاده از منطق کنترلی تعریف شده، با دستور زیر فعال می‌شود.

```
(t=6 andalso (#1F1)=18 andalso (#1z)=0) then
600 else (n,d,t)
```

لازم به ذکر است که در تنظیم مقدار زمان توقف قطار در سکوی اصلی دو مورد را باید در نظر گرفت. اولین مورد، نوع قطار موجود در مسیر کنارگذر جنوبی که در اینجا از طریق کنترل نظارتی F1 نشان داده شده در شکل۱۷ و با دستور (#1F1)=18 بررسی شده است. دومین مورد نیز وجود و یا عدم وجود قطار در مسیر کنارگذر شمالی است که با دستور (#1z)=0 انجام شده است،

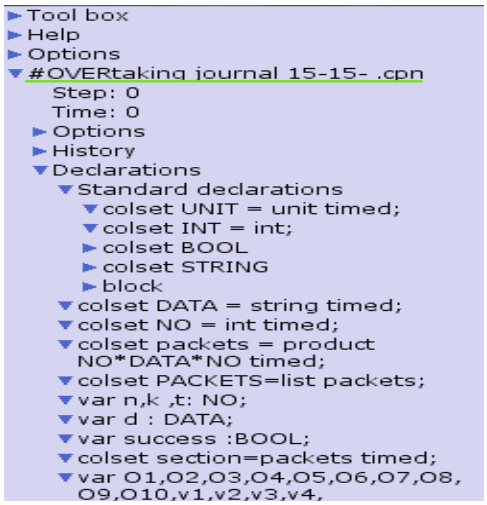
چنانچه قطاری موجود باشد، به دلیل در خواست مسیر مشترک، مدت زمان توقف قطار موجود در سکوی اصلی، سه دقیقه کاهش می‌یافت. در اینجا، با در نظر گرفتن قطار نرمال در مسیرکنارگذر جنوبی و عدم وجود قطار در مسیر کنارگذر شمالی مقدار ۶۰۰ ثانیه را در نظر گرفتیم. در ادامه نیز با توجه به کنترل نظارتی‌های تعریف شده F1,F2,F3,k8 با توجه به شکل ۲۰، گذر R3 غیرفعال و گذرهای t5,t6,t7 را فعال می‌کنیم تا به زمان ۱۸۷۰ ثانیه برای هر دو قطار برسیم. این زمان معادل با ۷۳۰ ثانیه توقف برای قطار نرمال در مسیر کنارگذر جنوبی است. از مرحله یازدهم به بعد چون دیگر کنترل نظارتی بین گذر R3 و مکان S7 به بعد تعریف نشده است، بنابراین برای هرکدام از رویدادها زمان متناسب با رویکرد پیش رو را در نظر می‌گیریم.



شکل ۲۰. کنترل نظارتی‌های تعریف شده بر روی گذر R3

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله به دلیل حجم بالای محاسبات از نرم افزار CPN Tools استفاده شده است. در این نرم‌افزار، هرمرحله از شبیه‌سازی با یک گره شماره‌گذاری شده، نشان داده می‌شود که بیانگر ترتیب حالت و موقعیت توکن‌های تعریف شده به همراه زمان سپری شده آنها در شبکه است. کمان‌ها نیز نشان‌دهنده جهت جریان ترافیک می‌باشند که گره‌های ابتدا و انتهای هر توکن را نشان می‌دهند. مقصد نهایی در این شبیه‌سازی، برای قطارهای دارای t = 2، مکان yard1 است که در انتهای مکان ۱ قرار گرفته است و برای قطار های دارای t = 1، مکان yard است که در انتهای بلوک ۸ قرار گرفته است. همانطور که تعریف کردیم، هر توکن از سه متغیر n، d و t تشکیل شده است. برای خواندن مقادیر تعریف شده از کنترل نظارتی استفاده کردیم که با دستور (#1A) برای کنترل نظارتی A مقدار المان اول این متغیر یعنی n خوانده می‌شود. همچنین این نرم‌افزار از دو بخش گرافیکی و کدنویسی تشکیل شده است. دستورات مربوط به کدنویسی در شکل ۲۱ آورده شده است.



شکل ۲۱. کدنوسی شبکه ریلی در نرم‌افزار Cpn Tools

همچنین ایمنی و عدم وقفه در شبکه مورد نظر نیز از طریق رسم درخت دسترس‌پذیری بیان می‌شود. برای هر درخت دسترس‌پذیری گزارشی ارائه می‌گردد که در شکل ۲۲ بخشی از این گزارش، برای شبیه‌سازی بخش اول، آورده شده است.

```
Statistics
------------------------
  State Space
     Nodes:  18
     Arcs:   20
     Secs:   0
     Status: Full
  Scc Graph
     Nodes:  18
     Arcs:   20
```

```
    Secs:   0
Boundedness Properties
  Best Integer Bounds
                                  Upper
Lower
    TimedProtocol'LOOP1 1   1       1
    TimedProtocol'LOOP2 1   1       1
    TimedProtocol's1 1      1       1
    TimedProtocol's2 1      1       1
    TimedProtocol's3 1      1       1
    TimedProtocol's4 1      1       1
    TimedProtocol's5 1      1       1
    TimedProtocol's6 1      1       1
    TimedProtocol's7 1      1       1
    TimedProtocol's8 1      1       1
    TimedProtocol'yard 1    1       0
    TimedProtocol'yard1 1   1       0
```

شکل ۲۲. بخشی از گزارش نرم‌افزار برای دو قطار با سرعت برابر

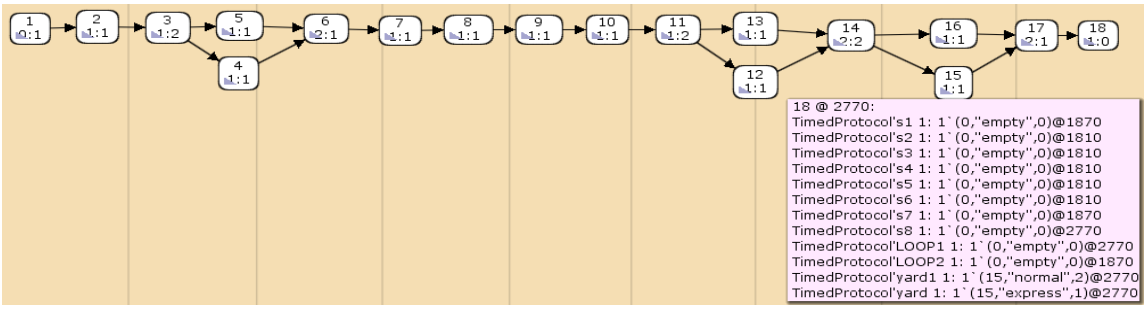
مطابق با گزارش ارائه شده برای دو قطار با سرعت برابر، تعداد حالت یا گره‌های ایجاد شده برابر با ۱۸ و تعداد کمان‌ها نیز ۲۲ است. همچنین طبق این گزارش وضعیت سیستم، کامل است که این امر نشان‌دهنده عدم برخورد قطارها و اتمام شبیه‌سازی تا مرحله نهایی و قرار گرفتن قطارها در مکان Yardها است. همچنین در بخش دوم این گزارش ارائه شده، (Best Integer Bounds)، مقدار حداکثر و حداقل نشانه‌های موجود در مکان‌های تعریف شده در شبکه را نشان می‌دهد که همواره یک نشانه در این مکان‌ها حضور داشته است یا به عبارتی بیان کننده برآورده شدن ایمنی مدل است. الگوریتم شبیه‌سازی سناریو برای دو قطار با سرعت برابر در جدول ۱ آورده شده است.

مطابق با جدول ۱، ستون اول نشان‌دهنده مراحل شبیه‌سازی، ستون دوم گذرهای فعال در هر مرحله، ستون سوم منطق کنترل نظارتی‌های طراحی شده به منظور فعال یا غیرفعال کردن گذرها، ستون چهارم دستورات خروجی بعد ازفعال شدن گذرها، ستون پنجم نیز زمان مورد نظر در هنگام فعال شدن گذرها و در انتها نیز جایگاه قطارها یا توکن‌ها بعد از فعال شدن گذرها را نشان می‌دهد

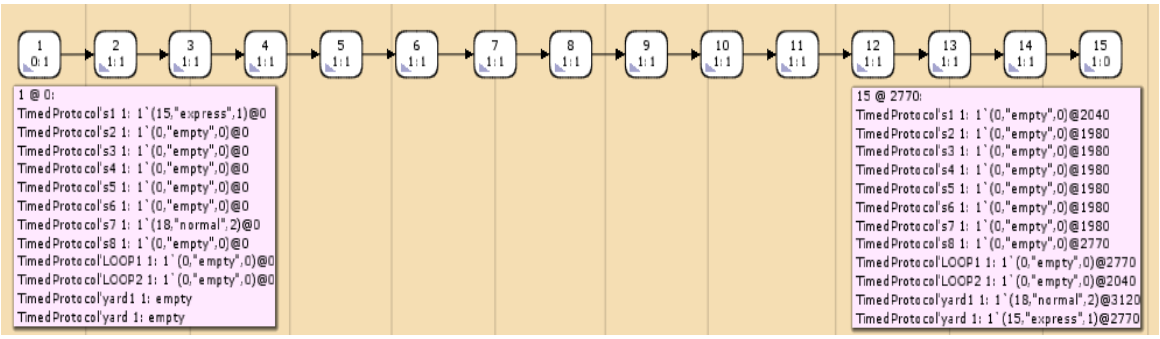
جدول۱. الگوریتم پیاده‌سازی ورود دو قطار با سرعت‌های یکسان به ایستگاه اصلی

مرحله	گذر	منطق کنترل نظارتی	منطق کمان خروجی گذر	زمان	
۱	-	-	-	-	s1 : (15,”express”,1) s7 : (15,” express”,2)
۲	t1	t=1 andalso (#3k7) <> 2 orelse (#1k7) > = n	if ((#1k7)=n andalso (#3k7)=2 then (n,d,3) else (n,d,t)	900	s2 : (15,”express”,3) s7 : (15,” express”,2)
۳	t2 v6	t=3 andalso (#3k8)<>2 t=2 andalso((#3k6)<>1 orelse (#1k6)>n(	غیرفعال @ +if ((#3k6)=3) then 0 else 105*n div 100*60	900	s2 : (15,”express”,3) s6 : (15,” express”,2)
٤	v5	t =2	if t=5 then (n,d,5) else (n,d,2)@+(if t=2 then 40 else 0)	940	s2 : (15,”express”,3) s5 : (15,”express”,2)
٥	t2	t = 1andalso (((#3O3) = t andalso (#1O3)<n	(n,d,1)@ + (if t=1 then 40else 0)	900	s3 : (15,”express”,1) s6 : (15,”normal”,2)
٦	v5 یا t2	t =2 یا t = 1andalso (((#3O3) = t andalso (#1O3)<n	@ +40 یا (n,d,1)@ + (if t=1 then 40 else 0)	940	s3 : (15,”express”,3) s5 : (15,”express”,2)
۷	t3	t = 1andalso (#3M9)<>2	غیرفعال	940	s3 : (15,”express”,1) loop2 :(15,”express”,4)

	V4	t=2 andalso ((#3w2)<>1 andalso(#1w2)<n)	غیرفعال		
	R4	t =2 andalso(#1w1)<=n andalso (#3w1)=1	if ((#3w1)=1 else (n,d,4)		
۸	t3	t = 1andalso(#3M9)<>2	@+20	960	s4 : (15,"express",1)
	R3	t = 4 andalso (#3O4)<>1	غیرفعال		loop2 :(15,"express",4)
۹	t4	t =1 andalso ((#3A1)<>2 andalso (#3A2)<>2andalso (#3A3)<>2)		1740	s5 : (15,"express",1)
	R3	t = 4 andalso (#3F1)<>1	@ + 13*60 غیرفعال		loop2 :(15,"express",4)
۱۰	t5	t =1	@+70	1810	s6 : (15,"express",1)
	R3	t = 4 andalso (#3k8)<>1	غیرفعال		loop2 :(15,"express",4)
۱۱	t6	t =1 andalso (#3k8)<>4	غیرفعال	1810	s6 : (15,"express",1)
	R3	t = 4	(n,d,2)		s2 :(15,"express",2)
۱۲	t6	t =1 andalso (#3k8)<>4	@+60	1870	s7 : (15,"express",1) s2 :(15,"express",2)
۱۳	v1	t=2	@+60	1870	s6: (15,"express",1) s1 :(15,"express",2)
۱٤	t6	t =1 andalso (#3k8)<>4	@+60	1870	s7: (15,"express",1)
	یا	یا			
	v1	t =2	@+60		s1 :(15,"express",2)
۱۵	Y1	t =2	@+ **((105*n div 100)*60))**	2770	s7 : (15,"express",1) yard1 : (18,"normal",1)
۱٦	t7	t =1	@+(((105*n div 100)*60))	2770	s8: (15,"express",1) s1 :(15,"express",2)
۱۷	Y1	t =2	@+(**((105*n div 100)*60))**	2770	s8 : (15,"express",1) yard1 : (18,"normal",1)
	یا	یا			
	t7	t =1			
۱۸	t8	t =1 andalso (#1u1)=0	-	2770	yard : (15,"express",1) yard1 : (18,"normal",1)



شکل ۲۳. درخت دسترس‌پذیری دو قطار با سرعت برابر



شکل ۲٤. درخت دسترس‌پذیری دو قطار با سرعت نابرابر

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی برای قطار سریع السیر و نرمال

تعداد گره‌ها	۱۵
تعداد کمان‌ها	۱۵
وضعیت گراف	کامل
زمان سپری شده برای قطار سریع السیر (ثانیه)	۲۷۷۰
زمان سپری شده برای قطار نرمال (ثانیه)	۳۱۲۰

زمان بدست آمده طبق حالت نهایی درخت دسترس‌پذیری رسم شده در شکل ۲۳، برای دو قطار با سرعت برابر معادل با ۲۷۷۰ ثانیه است. نتایج مشابه برای قطارهای با سرعت‌های متفاوت مطابق جدول ۲ آورده شده است که می‌توان تحلیلهای مشابه را برای این شبیه‌سازی نیز در نظر گرفت

٦. نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی کنترل نظارتی یک ایستگاه با حفظ شرایط ایمنی و عدم برخورد در دو حالت قطارهای سریع‌السیر با سرعت یکسان و یک قطار سریع‌السیر و یک قطار نرمال با سرعت متفاوت انجام شده است. ابتدا مفاهیم شبکه‌های پتری، انواع آن و کنترل نظارتی بیان گردید. سپس بلاک بندی یک ایستگاه نمونه با توجه به مفاهیم بیان شده در این مقاله مدلسازی شده است که در آن، قطارها در دو جهت در شبکه حرکت می‌کردند. از طرفی به منظور برآوردن الزامات ایمنی و عدم برخورد، کمانهایی طراحی گردید که برچسب‌های هر کمان نقش کنترل نظارتی مبتنی بر شبکه پتری داشته و این الزامات را برآورده می‌کرد.

در ادامه، شبیه‌سازی در دو بخش ارائه گردید. در بخش اول، دو قطار سریع‌السیر و در بخش دوم یک قطار سریع‌السیر و یک قطار نرمال در نظر گرفته شد. در نهایت با رسم درخت دسترس‌پذیری برای هر بخش، ایمنی و عدم برخورد تضمین گردید. همچنین مدت زمان سیر حرکت قطارها تا اتمام شبیه‌سازی در درخت دسترس‌پذیری ارائه گردید. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به سادگی آن اشاره کرد. همچنین عدم نیاز به برنامه‌ریزی مجدد در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی، عدم بازگشت به عقب و صوری بودن روش مدلسازی از دیگر مزیت‌های این روش است.

۷. پی نوشت‌ها

[1]. Place
[2]. Transitions
[3]. Tokens
[4]. Kurt Jenson
[5]. Color
[6]. Guards
[7]. Expression

[8] Time stamp
[9]. Finite state automation
[10]. Untimed (or logical) level of abstraction
[11]. Timed colored petri net
[12] Running
[13]. Dwelling

۸. مراجع

-Braaksma, A. (2008) ”Deadlock problems in Railway scheduling”, Traineeship at School of Mathematics and Statistics, University of South Australia, Adelaide

- Cassandras, C. G. and Lafortune, S. (2009) “Introduction to discrete event system”, Springer Science & Business Media.

- Cui, Yong (2010) “Simulation-based hybrid-model for a partially-automatic dispatching of railway operation”, Dissertation, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart.

-Durmuş, M. and Söylemez, M. (2010) “Signalization and interlocking design for a railway yard: A supervisory control approach by enabling arcs,” in The 7th International Symposium on Intelligent and Manufacturing Systems.

-Durmuş, M., Akın, K and Söylemez, M. (2010) “Supervisory control approach by inhibitor arcs for signalization and interlocking design of a railway yard”, International Symposium on Intelligent Systems and Applications, Turkey, June 2010, pp. 21–24.

- Fang, W., Sun, J., Wu, X. and Yao, X. (2013) “Re-scheduling in railway networks”, in Computational Intelligence (UKCI), 2013 13th UK Workshop on, 2013, pp. 342–352.

-Fanti, M., Giua, A. and Seatzu, C. (2006)”Monitor design for colored petrinets: An application to deadlock prevention in railway networks” Control Engineering Practice, Vol.14, No. 10, pp.1231-1247.

-Guia, A. Seatzu (2008) ”Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets” , IEEE , Tran, Vol. 5 , pp. 431-445.

-Havender, J. W. (1968) “Avoiding deadlock in multitasking systems”, IBM SYST 2S. pp.74-84

- Hei, X., Takahashi, S. and Nakamura, H. (2006) “Distributed interlocking system and its safety verification”, Proc. of the 6th. World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21-23, Dalian, China

-Ismaili, F. (2005) "Blocking of a new technique for reducing headways and increasing the capacity of Garlic", the Seventh Conference of Rail Transport, Sharif University, May.

-Min,W. and Jun-Wei., Q. (2012) “Properties of train traffic flow in a moving block system,” Chinese Phys. B, Vol. 21, No. 7, p. 70502. Haag,Holland, pp. 6216-6219

-Moen, A. and Hagalisletto, C. (2004)”Large scale construction of rail-road models from specifications” in Proceedings, IEEE int.conf.sys-

-Pachl, J. “Deadlock avoidance in railroad operations simulations”, Transportation Research Board in Washington DC, 23-27 Jan 2011, Paper No. 11-0175

-Petersen, E. R. and Taylor, A. J. (1983) “Line block prevention in rail line dispatch and simulation models”, Information Systems and

Operations Research, Vol. 21, No. 1, pp. 46-51.

-Ren, X. and Zhou, M. (1995) “Tactical scheduling of rail operations: a Petri net approach”, 1995 IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern. Intell. Syst. 21st Century, Vol. 4.

-Rozenberg, G. and Reisig, W. (1998) “Lectures on Petri Nets I: Basic Models”, Springer

-Reveliotis, A. (2000) ”Conflict resolution in AGV systems “ , IIE Transactions, Vol. 32, No. 7, pp. 647-659.

- Seçkin, M. (2013) “The application of automation theory to railway signaling systems: The Turkish National Railway Signaling Project”, Control Engineering Department, Istanbul Technical University, TR-34469, İstanbul, Turkey.

-Xun , J., Ning, B., Li, K. and Zhang, W. (2013) “The impact of end-to-end communication delay on railway traffic flow using cellular automata model,” Transp. Res. Part C Emerg. Technol., Vol. 35, pp. 127–140

-Wang, P., Goverde, S. and Wang, Q. (2016) “Rescheduling trains using Petri nets and heuristic search”, IEEE Transactions. Intell. Transp. Syst., Vol. 17, No. 3, pp. 726–735.

-اشکی، م. (۱۳۹۵) " مدل سازی و اجرای کنترل نظارتی با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی بر روی سیستم سیگنالینگ ریلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد زیر نظر دکتر بهمن قربانی واقعی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-قربانی واقعی، ب. و عباسی، م. (۱۳۹۳) "مدلسازی و تحلیل شبکه ریلی قطارهای عادی و سریع السیر مبتنی بر شبکه پتری "، فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره سوم، ص. ۳۶۱-۳۸۰.

-قربانی واقعی، ب. و اشکی، م. (۱۳۹۶) " مدل سازی و اجرای کنترل نظارتی با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی بر روی سیستم سیگنالینگ ریلی"، فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی حمل و نقل، پذیرفته شده برای چاپ ۱۳۹۶.

-عباسی، م. (۱۳۹۱) " مدل سازی وکنترل نظارتی یک سیستم خط بسته ریلی با استفاده از شبکه پتری"، پایان نامه کارشناسی ارشد زیر نظر دکتر بهمن قربانی واقعی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

بهمن قربانی واقعی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-کنترل در سال ۱۳۷۹ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برق-کنترل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کنترل نظارتی و سیستمهای رویداد گسسته، کنترل و سیگنالینگ قطار و قطارهای مغناطیسی مگلو بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.

وحیده نصر، درجه کارشناسی در رشته برق- کنترل را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی شیراز و درجه کارشناسی ارشد در رشته کنترل و علائم در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود.