مدلسازی و تحلیل شبکه ریلی قطارهای عادی و سریع السیرمبتنی بر شبکه پتری

بهمن قربانی واقعی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مجید عباسی(مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail:abbasima1356@yahoo.com

دریافت: ۹۲/۰۳/۲۲ پذیرش: ۹۲/۰۸/۲۰

چکیده:

امروزه روشهای مدلسازی با استفاده از شبکه‌های پتری به دلیل قابلیت گرافیکی آن در شبکه‌های گسترده و پیچیده ، بخصوص با گسترش علوم رایانه‌ی و افزایش سرعت پردازنده‌ها، کاربرد فراوانی پیدا کرده است. شبکه‌های راه آهن نیز با گسترش خطوط ریلی ، افزایش ظرفیت و افزایش سرعت قطارها پیچیده تر شده و تقاضا برای کنترل این شبکه‌ها از نظر ایمنی و عدم وقفه رو به افزایش است . در این مقاله یک شبکه خط بسته ریلی که قطارهای عادی و سریع السیر می توانند در آن در حال حرکت باشند، با استفاده از مفاهیم مکانها،گذرها و کمانها در شبکه پتری مدل شده است . با استفاده از آنالیز شبکه مدل شده توسط رایانه، تمامی فضای حالت شبکه ریلی ترسیم شده وقوانین منطقی حرکت چنان طراحی شده است که در تمامی حالتهای ممکن، ایمنی و عدم وقفه شبکه ریلی تضمین شود. پس از تحلیل توسط نرم‌افزار حالت های وقفه در شبکه شناسایی و شرایطی که منجر به وقفه می‌شود تعیین می‌گردد. در نهایت با تحلیل شبکه ریلی بسته براساس تعداد مختلف قطارهای عادی و سریع السیر با ملاحظات عملی نشان داده می‌شود که سیستم بدون وقفه بوده و همواره ایمن باشد.

واژه های کلیدی : مدلسازی مبتنی بر شبکه های پتری ، سیستم حمل و نقل ریلی ، تحلیل ایمنی

۱. مقدمه

روشهای مدلسازی در شبکه های گسترده و پیچیده، به خصوص با گسترش علوم رایانه و افزایش سرعت پردازنده ها کاربرد فراوانی پیدا کرده است. شبکه های ریلی، یک بخش مهم از سیستم‌های حمل و نقل دنیا است که دارای امنیت زیادی است و به همین دلیل اهمیت ویژه ای نسبت به سایر سیستم‌های حمل و نقل دارد. افزایش ظرفیت، افزایش سرعت قطارها و هم چنین افزایش پیچیدگی شبکه های راه آهن، تقاضا برای کنترل این شبکه‌ها را افزایش داده است [Bago et.al. 2009] . عمده شبکه های ریلی شامل دو خط هستند که به صورت یک جهته بهره‌برداری می شوند. چنان که خطوط ریلی به صورت یک خط دو طرفه بهره‌برداری شوند نیاز به طراحی مسیر کنارگذر در شبکه ریلی است تا امکان عبور دو قطار مختلف‌الجهت در یک مسیر فراهم آید [Pawlewski, 2010]. در این مقاله شبکه ریلی یی مد نظر است که قطارهای موجود در شبکه، تنها در یک جهت در حال حرکت بوده و با توجه به دو خطه بودن اکثر شبکه‌های ریلی، جهت ایجاد مسیر رفت و برگشت قطارها، شبکه ریلی به صورت یک مسیر خط بسته در نظر گرفته شده است. در شبکه‌های ریلی انواع مختلف قطارها با سرعت متفاوت میتوانند حرکت کنند و به دو نوع عادی و سریع‌السیر تقسیم بندی میشوند [Durmus et.al. 2009]. در این مقاله هر دو نوع این قطارها بر روی شبکه ریلی می‌توانند حرکت کنند.

شبکه های پتری، ابزارهای قدرتمندی برای آنالیز و کنترل سیستم‌های توزیعی و همزمان هستند. شبکه‌های پتری با قابلیت نمایش گرافیکی، بیان مفاهیم ریاضی سیستم، شبیه سازی وضعیت موجود به همراه تکنیک آنالیز فرمولها، استفاده از ابزارهای رایانه‌ای موجود برای شبیه سازی، آنالیز و کنترل را در اختیار طراح قرار می‌دهند. شبکه‌های پتری در سال ۱۹۶۲ توسط کارل آدام پتری برای اولین بار معرفی شده است [Wolfgang et.al, 1998].

مرجع [Hartmut et.al. 2002] مفاهیم پایه شبکه‌های پتری مانند گذر، مکان، کمان و نشانه‌گذاری را به صورت مدون تنظیم کرده و این شبکه‌ها را به صورت گرافیکی و صوری تعریف کرده است که در اکثر فعالیت‌های پژوهشی از همین روش برای بیان شبکه‌های پتری استفاده شده است. در این مقاله نیز از مفاهیم موجود در این مرجع برای مدلسازی استفاده می‌شود. در مرجع [Wil et.al. 2009] نحوه ترسیم درخت دسترس‌پذیری و فضای حالت برای شبکه‌های پتری بیان شده است که به کمک درخت دسترس‌پذیری می‌توان الگوریتم اجرای شبکه‌های پتری را پیاده‌سازی کرد. از الگوریتم اجرای شبکه‌های پتری در مرجع [Wil et.al.2009] برای اجرای شبکه‌ریلی بسته در مقاله حاضر استفاده شده است. مرجع [Hartmut et.al. 2002] پژوهش‌هایی است که در زمینه مدلسازی و آنالیز سیستم‌های راه‌آهن با استفاده از شبکه های پتری انجام شده است و در آن وضعیت‌های اشغال سیرگاه توسط قطارها به وسیله شبکه‌های پتری مدلسازی شده است. از ایده این مرجع جهت مدلسازی سیرگاه در شبکه ریلی بسته مقاله استفاده شده است. ژو [Zhou] و رن [Ren] در مرجع [Ren et.al. 1995] شبکه های پتری را برای تحلیل جداول اعزام و ورود قطار مدلسازی کرده و با تمرکز روی اجرای شبکه‌های پتری، قواعد اجرایی را چنان استخراج کردند تا جداول اعزام و ورود قطار ایمن و کارآمد باشند. از همان قواعد اجرا در این مقاله بهره برداری شده است تا شبکه ریلی بسته ایمن باشد. مرجع[Ren et.al.1995] و [Guia et.al. 2008] شبکه ریلی را به صورت خط، سوزن و ایستگاه تقسیم کرده است. شبکه ریلی که در مرجع [Guia et.al. 2008] مدلسازی شده است، شامل شبکه پتری با گذرهای قابل کنترل و مشاهده پذیر است که این مشاهده‌پذیری و کنترل پذیری منوط به وجود سیگنال و مدارراه در شبکه ریلی بسته بوده است و در نهایت شبکه ریلی بدون وقفه طراحی شده است. در مقاله حاضر از روشهای مرجع [Guia et.al. 2008]

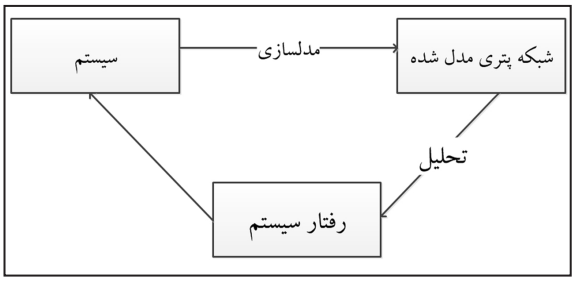
جهت ایجاد شبکه ریلی بدون وقفه استفاده شده است. این مرجع شبکه ریلی قطارهای عادی و سریع‌السیر را با استفاده از شبکه‌های پتری رنگی مدلسازی کرده است که در آن رنگ و صفت نشانه در شبکه پتری رنگی، بیانگر نوع قطار در شبکه ریلی باشد. به دلیل آنکه در مقاله حاضر دو نوع قطار با کاربری متفاوت در مسیر ریلی بسته در حرکت هستند از شبکه پتری رنگی مرجع [Guia et.al. 2008] برای مدلسازی استفاده شده است.

مشخصات، آنالیزها و اجرای سیستم‌های کنترل ریلی بسیار با اهمیت است، زیرا خرابی آن منجر به تصادف، تلفات انسانی و مالی خواهد شد. برای بهره برداری ایمن و بدون وقفه شبکه ریلی نیاز به تحلیل سیستم ریلی است. تحلیل شبکه های ریلی شامل دو قسمت است: ۱- تحلیل منطق ۲- تحلیل اجرا. در تحلیل منطق، با ایجاد ساختار امن(عاری از برخورد) و بی وقفه (بدون اینکه در بهره برداری خط توقفی ایجاد شود)نشان داده می‌شود که سبب ایجاد رضایتمندی مشتری از شبکه حمل و نقل ریلی می‌شود. تحلیل اجرا به کارکرد شبکه وابسته است و روی مسائلی از قبیل جداول اعزام و ورود قطار به ایستگاه متمرکز است و کارآیی سیستم را بهبود می‌بخشد[Park et.al. 2002]. در این مقاله استخراج قوانین منطقی مورد نظر است که به وسیله آن بتوان شبکه ریلی را بدون وقفه و به صورت ایمن بهره برداری کرد. مراجع [Park et.al.2002] ، [Li et.al.2004] با استفاده از اعمال کنترل کننده منطق بر روی گذرهای شبکه‌های پتری، این شبکه‌ها را مطابق قوانین و مقررات بهره‌برداری خط اجرا می‌کنند. در همه مقالات فوق ، تعداد قطار عادی و سریع السیر، یکی است. در مقاله حاضر تحلیل شبکه پتری بر اساس تعداد متنوع قطار عادی و سریع‌السیر چنان انجام می‌شود که قادر است وسیله‌ای جهت تضمین ایمنی و عدم وقفه شبکه ریلی با تحلیل مبتنی بر شبکه پتری ارایه کند.

در این مقاله، ابتدا شبکه های پتری معرفی و خواصی از این شبکه‌ها که در مدلسازی شبکه ریلی خط بسته مد نظر است بیان می‌شود. سپس یک سیستم خط بسته ریلی ارایه می شود که تعداد متنوعی از قطارهای سریع السیر و عادی در این شبکه در حال حرکت هستند. مفاهیم سیرگاه ثابت، قوانین و مقررات بهره‌برداری خط شامل ایمنی، سبقت قطار سریع السیر، بهره برداری از حلقه کنارگذر، عدم گیر افتادن قطار عادی در حلقه کنار گذر و عدم استفاده قطار سریع السیر از حلقه کنار گذر برای شبکه ریلی بسته تعریف شده‌اند. سپس با اجرای شبکه پتری مدل شده توسط نرم‌افزار،تمامی حالتهای ممکن از فضای حالت ترسیم می گردد و با توجه به درخت فضای حالت قابل دسترس، شرایط انسداد و وقفه در بهره برداری خط مشخص می گردد. در ادامه با گرافهای دسترسی به دست آمده شبکه ریلی از نظر عدم وقفه تحلیل می‌شود. در نهایت نتیجه گیری از این مقاله ارایه می‌شود.

۲. معرفی شبکه های پتری

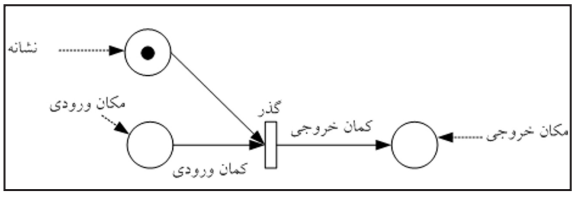
صورت بندی به یک زبان صوری و مبتنی بر نوعی از ریاضیات برای توصیف و بیان مدلها گفته می‌شود. تعریف شبکه های پتری با استفاده از نظریه کیسه ارایه می شود. نظریه کیسه یا چند مجموعه یک بسط از نظریه مجموعه هاست که در آن ، هر کیسه برخلاف مجموعه می تواند اعضای تکراری داشته باشد. برای مدلسازی مبتنی بر شبکه‌های پتری ، ابتدا سیستم مطابق (شکل ۱) به صورت یک شبکه پتری مدلسازی شده و سپس تحلیل می‌شود. هر مشکلی که در تحلیل به وجود آید ، به منزله نقص در طراحی بوده و باید جهت رفع نقص، طرح بازبینی و اصلاح شود. مجدد مرحله تحلیل شبکه پتری تکرار می‌شود تا تمام مشکلات موجود در سیستم مرتفع گردد. البته این روش برای سیستم‌های در حال بهره برداری و زیر بار نیز بکار می رود. در روش بالا، سیستم طراحی شده و شبکه پتری به صورت دائمی به یکدیگر تبدیل می شوند.



شکل ۱. مراحل مدلسازی با شبکه پتری

۲-۱ مفاهیم اولیه در صورت بندی

هر صورت بندی مدلسازی متشکل از حداقل دو مفهوم اولیه حالت و کنش است. در شبکه های پتری مفهوم اولیه مکان برای توصیف حالتهاست و مفهوم اولیه گذر برای مدلسازی کنشهاست. ساختار شبکه های پتری یک ۵ تایی $C=(P,T,I,O,m_0)$ است . این شبکه از مجموعه ای ازمکان ها که با P نمایش می‌دهند و مجموعه ای از گذرها که با T نمایش می دهند تشکیل شده است . توابع ورودی I و توابع خروجی O که رابطه محل ها و گذرها را مشخص می‌کند. اجزا شبکه پتری در نمایش گرافیکی این شبکه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است . هر شبکه پتری از سه جز اصلی تشکیل شده است که شامل مکان ، گذر و کمان است .

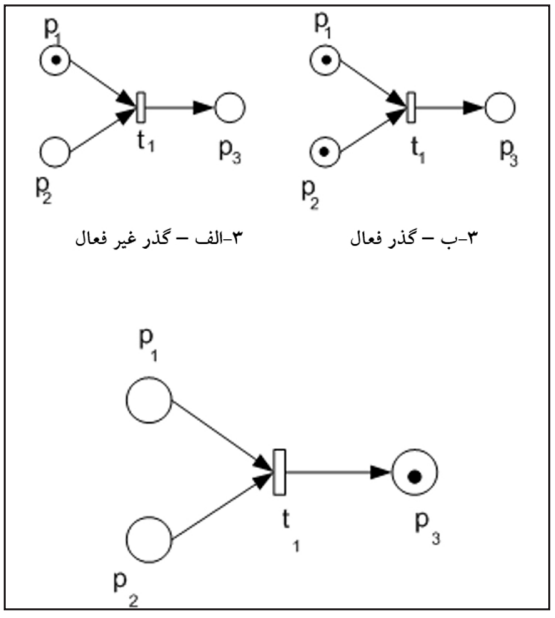


شکل ۲. نمایش گرافیکی شبکه های پتری

مکانها که با دایره نشان داده شده و حالتهای امکان پذیر سیستم را مدل می کنند .گذرها که با مستطیل نشان داده شده و رخدادها یا کنشهایی هستند که باعث تغییر حالتها می شوند.کمانها که با پیکان نمایش داده می شوند و مکانها را به گذرها و گذرها را به مکانها متصل می کنند .در کنار این سه جزء اصلی نشانها هم وجود دارند که نشانه گذاری یا مقادیر قرار گرفته در مکانها را مشخص می کنند.البته می توان برای کمانها و نشانها عددی را به عنوان وزن نیز در نظر گرفت که به صورت برچسب بربالای کمان و داخل مکان نوشته می شود که مفهوم این عدد تعداد نشانه‌ها می باشد.

۲-۲ قانون فعال سازی گذر و شلیک کردن :

یک گذر، فعال است در صورتی که هر مکان ورودی به تعداد برچسب ها یک کمان خروجی متصل به آن مکان دارای نشانه باشد . به عنوان مثال در شکل ۳ – الف گذر t1 غیر فعال و یا ناتوان است ولی این گذر در شکل ۳–ب فعال و یا توانا است که پس از شلیک این گذر شکل ۳– ب به صورت شکل ۴ تغییر می‌یابد .



شکل ۴. نشانه گذاری مکان ها پس از شلیک گذر یک در شکل ۳–ب

۲-۳ دسترس پذیری

دسترس پذیری، به حالتها یا نشانه گذاری‌های یک شبکه پتری مربوط است . دسترس پذیری به این معنی است که آیا در اجرای یک شبکه پتری از یک حالت می توان به حالت دیگری رسید؟

قابلیت دسترسی مفهوم اساسی برای مطالعه خواص دینامیکی هر سیستم است. شلیک هر گذر فعال توزیع نشانه‌ها را با توجه به قانون گذر تغییر خواهد داد . توالی شلیک ها به توالی نشانه‌گذاری‌ها می انجامد تا در نهایت تمامی حالت های شبکه به دست آید.

۲-۴ ایمنی

با توجه به نظر لامپورت در شبکه‌های پتری ، ایمنی به این معنی است که هرگز اتفاق بدی نخواهد افتاد. این خصوصیت در مورد سیستمی برقرار است که حتی یک حالت ممنوع شده در رفتار آن بروز نکند . برای نمونه در یک شبکه ریلی خط بسته هیچگاه حالتی رخ نمیدهد که در یک خط ریلی دو قطار در جهت مخالف حرکت کنند و یا بیش از ظرفیت خط، قطار بر روی خط وجود داشته باشد .

۲-۵ زنده بودن و عدم وقفه

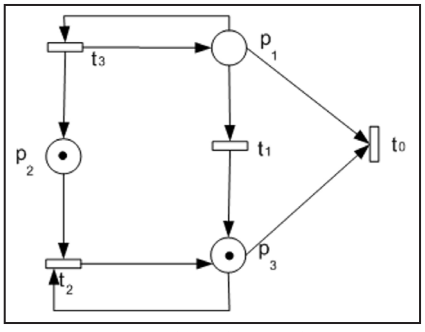
با توجه به نظر لامپورت در شبکه‌های پتری ، خصوصیت زنده بودن بیان می کند که سرانجام، اتفاق خوبی خواهد افتاد . این خصوصیت در مورد سیستمی است که رفتارش مطابق کارکرد مورد نظر است . یک شبکه پتری زنده است، در صورتی که هر گذری سرانجام بتواند شلیک کند. به این نوع شبکه پتری، شبکه پتری زنده می‌گویند . از طرفی یک گذر زمانی مرده است، اگر هرگز و در هیچ دنباله ای از شلیک کردنها نتواند شلیک کند و در دنباله نشانه گذاری‌ها به عنوان برچسب هیچ کمانی ظاهر نشود . از این تعاریف به این نکته می رسیم که یک شبکه پتری زنده است، اگر هیچ گذر مرده ای در شبکه وجود نداشته باشد . برای مثال در یک شبکه ریلی حالتی رخ ندهد که قطار در یک سیرگاه متوقف شود و می بایست همیشه مجوز ورود به سیرگاه بعدی برای قطار صادر شود. در صورتی که در شبکه پتری بتوان به حالتی رسید که در آن هیچ گذری توانا نباشد و نتواند شلیک کند، اصطلاحاً حالت بن بست (وقفه) برای شبکه پتری پدید می‌آید.

۲-۶ فضای حالت شبکه های پتری

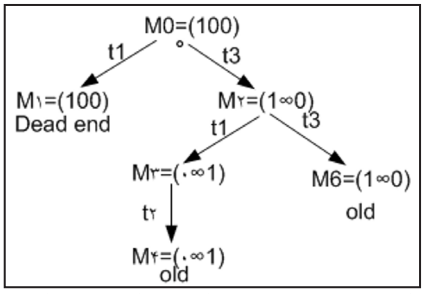
حالت ها در شبکه های پتری با نشانه گذاری‌ها مشخص می‌شوند. تحلیل شبکه های پتری نیز بر اساس فضای حالت یا مجموعه نشانه گذاری‌های دسترس پذیر مدل انجام می شود. به مجموعه نشانه گذاری‌های حاصل از اجرای یک شبکه پتری حالت‌های دسترس پذیر یا مجموعه دسترس پذیری یا فضای حالت گفته می‌شود . اغلب فضای حالت را با درخت دسترس پذیری نمایش می‌دهند که نشان دهنده دنباله ای از حالتها در فضای حالت یا دنباله ایی از شلیک گذرهای شبکه پتری است.

۲-۷ درخت دسترس پذیری

درخت دسترس پذیری یک نمایش از همه نشانه گذاری‌های امکان پذیر است که به صورت یک درخت نمایش داده می‌شود . برای مثال درخت دسترس پذیری شبکه پتری شکل ۵ در شکل ۶ نمایش داده شده است .



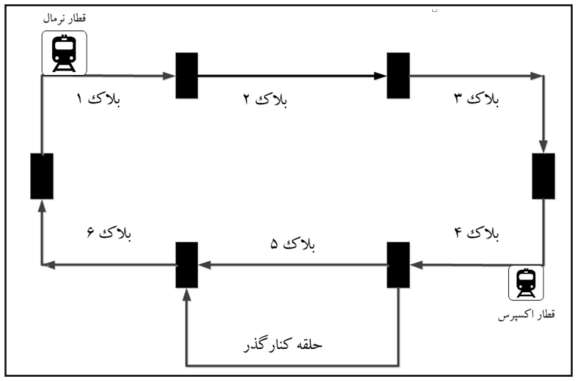
شکل ۵. یک شبکه پتری



شکل۶. درخت دسترس پذیری شبکه پتری شکل ۵

۳. شبکه ریلی بسته ساده

در این مقاله یک شبکه ریلی تحت مدلسازی و تحلیل قرار می‌گیرد که مطابق شکل ۷ یک شبکه خط بسته است و ۶ سیرگاه اصلی در آن وجود دارد. یک حلقه کنار گذر در شبکه ریلی بسته در نظر گرفته می‌شود تا امکان سبقت برای قطارها فراهم گردد. همان طور که در شکل ۷ مشخص است قطارهای عادی و سریع‌السیر در این شبکه ریلی در حال حرکت هستند. در این شکل قطار عادی در سیرگاه ۱ و قطار سریع‌السیر در سیرگاه ۴ در حال حرکت است.



شکل ۷. یک شبکه ریلی بسته ساده

برای ساده سازی مدلسازی فرض می‌شود که قطارها فقط در جهت عقربه‌های ساعت در حال حرکت هستند و دو قطار در خلاف جهت هم در یک سیرگاه حرکت نمی‌کنند. از طرفی حداکثر ظرفیت هر خط، یک قطار در هر سیرگاه تعیین می‌شود. برای این شبکه ریلی بسته اهداف کنترلی و یک سری از قوانین و الزامات بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود که یک الزام مربوط به ایمنی و چهار الزام مربوط به شرایط بهره‌برداری خط است:

الزام ایمنی: الزام ایمنی بیان می دارد که در هر کدام از سیرگاه ها می بایست یک قطار حضور داشته باشد و یا قطاری در سیرگاه نباشد. این الزام شرایط بهره برداری بدون تصادف و برخورد را در خط برقرار می‌کند.

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

الزام عملیاتی دو (سبقت قطار سریع السیر): این الزام بهره‌برداری به منظور آن است که چنانچه قطار عادی در کنار حلقه کنارگذر و در سیرگاه ۴ باشد و همچنین قطار سریع‌السیر پشت سر قطار عادی در سیرگاه ۳ باشد باید شرایط سبقت برای قطار سریع‌السیر فراهم گردد، یعنی قطار عادی به حلقه کنارگذر هدایت می‌شود و قطار سریع السیر از آن سبقت گرفته و به مسیر ادامه می دهد. پس از سبقت قطار سریع‌السیر، قطار عادی به مسیر خط بسته برمی‌گردد.

الزام عملیاتی سه: این الزام بیان می کند که قطار عادی نباید در حلقه کنار گذر متوقف شود. حلقه کنار گذر فقط برای توقف موقتی در نظر گرفته شده و شرایط سبقت را برای قطار سریع‌السیر فراهم می‌آورد. بدیهی است که پس از اتمام فرآیند سبقت قطار عادی باید از حلقه کنارگذر خارج شده و به مسیر اصلی برگردد. به عبارت دیگر قطار عادی نباید در حلقه کنار گذر به تله افتد.

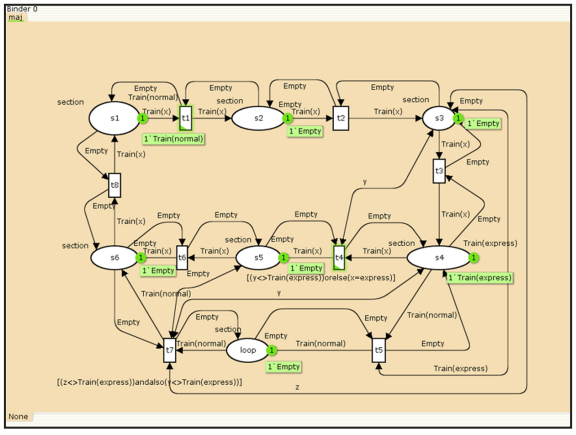
الزام عملیاتی چهار: قطار سریع السیر نباید هرگز وارد حلقه کنارگذر شود. حلقه کنارگذر فقط برای قطارهای عادی در نظر گرفته شده و قطار سریع‌السیر نمیتواند از این حلقه استفاده کند.

الزامات بالا نیازهای بهره برداری است که جهت شبکه ریلی بسته فرض شده است و باید در تمام مراحل تجزیه و تحلیل کارکرد شبکه ریلی بسته رعایت گردد. در مرحله اجرا باید برآورد کرد که چه ترکیب متنوعی از قطارهای عادی و سریع‌السیر در این شبکه ریلی بسته میتوانند حضور داشته باشند و در چه شرایطی قوانین بالا نقض می‌گردد. سپس با اصلاح ساختار و یا شرایط بهره‌برداری شبکه ریلی بسته طراحی می‌گردد که با حداکثر توان خود به کار ادامه دهد.

۳-۱ مدلسازی شبکه ریلی بسته ساده با استفاده از شبکه پتری

برای مدلسازی شبکه ریلی خط بسته (شکل ۷) ابتدا باید حالت‌ها و کنش‌های شبکه ریلی را مشخص کرد. شبکه ریلی بسته شامل ۶ سیرگاه اصلی و یک سیرگاه کنار گذر است که هر کدام از این سیرگاه‌ها در هر لحظه یا توسط یک قطار اشغال می‌شود و یا قطاری درسیرگاه حضور ندارد.

مدلسازی وضعیت سیرگاه‌ها: وضعیت اشغال و یا عدم اشغال سیرگاه توسط قطارها نشان دهنده حالتهای خط مربوط به شبکه ریلی است. به همین منظور هفت حالت برای شبکه ریلی بسته در نظر گرفته می‌شود که شش حالت مربوط به شش سیرگاه اصلی و یک حالت برای سیرگاه فرعی است. این هفت حالت، توسط هفت مکان در شبکه پتری مدل میگردد. با توجه به تعداد بلاک‌ها در مسیر شبکه ریلی خط بسته، هفت مکان جهت مدلسازی شبکه پتری در نظر گرفته می‌شود که شش مکان برای شش بلاک اصلی و یک مکان برای بلاک کنار گذر است. همان طور که در شکل ۸ نمایش داده شده است مکان‌ها تعریف می شوند.



شکل ۸ مدل پتری شبکه ریلی بسته شکل ۷

شش مکان اصلی با S۱ تا S۶ نمایش داده می‌شوند و مکان کنار گذر با S(loop) معرفی می‌شود. مجموعه مکان‌ها شامل {(S1,S2,…,S6,S)loop} است.

مدلسازی کنش بین سیرگاهها: برای اینکه تبدیل وضعیت سیرگاه‌ها در هر لحظه مشخص شود باید کنش‌ها مشخص شوند. برای نمایش کنش‌ها از گذرهای t۱ تا t۸ استفاده شده است که بین هر دو مکان متوالی جاگذاری شده است. این گذرها مشخص می‌کنند که وضعیت سیرگاه‌ها یا مکان‌ها در هر لحظه چگونه می‌تواند تغییر نماید.

نشانه‌گذاری مکان‌ها: در (شکل ۷) در سیرگاه یک، یک قطار عادی در حال حرکت است، که با توجه به آن در مکان S۱ در (شکل ۸) نشانه normal وجود دارد و در سیرگاه چهار (شکل ۷) یک قطار سریع‌السیر در حال حرکت است که برای آن یک نشانه express در مکان S۴ قرار گرفته است. به این ترتیب نشانه‌گذاری(شکل۸) به صورت (normal,empty,empty,express,empty,empty,empty) خواهد بود .

مدلسازی کمان‌ها در شبکه پتری: برای اینکه شرایط بهره‌برداری و الزامات خط مشخص گردد، باید شرایط گذرها و مکان‌ها به وسیله کمان‌های اتصال دهنده تعیین شود. جهت تبدیل وضعیت هر مکان که در واقع تعیین وضعیت حرکت قطار از یک سیرگاه به سیرگاه دیگر است، ابتدا باید مطمئن بود که سیرگاه مقابل خالی باشد. به این منظور ازکمان‌های کمرنگ استفاده شده که با برچسب empty شرایط عدم حضور قطار را به مکان یا گذر قبلی اعلام می‌کند تا شرایط تبدیل وضعیت فراهم شود. از طرفی برای اینکه وضعیت حرکت قطار در مسیرهای اصلی فراهم شود بر روی کمان‌های اتصال دهنده مکان‌ها و گذرهای اصلی از کمان‌های پررنگ با برچسب x استفاده شده است که x شامل قطار عادی و قطار سریع‌السیر است. برای حلقه کنارگذر این کمان فقط شامل قطار عادی است که با برچسب normal مشخص شده است. این کمان مشخص می‌کند که فقط نشانه normal می‌باید به مکان S(loop) منتقل شود.

مدلسازی الزام سبقت: برای آنکه شرایط سبقت در شبکه پتری مدل شده فراهم شود کنترل نظارتی که به گذر چهار متصل است

و یک کمان دو جهته است به مکان‌های سه و چهار توجه دارد. چنان که منطق عبارت (y<>express) OR (x=express) این گذر درست باشد، شرایط سبقت فراهم می‌شود و قطار عادی به حلقه کنارگذر رفته و قطار سریع‌السیر سبقت می‌گیرد. به بیان دیگر نشانه normal از مکان S۴ به مکان S(loop) منتقل شده و نشانه express از مکان S۳ به مکان S۴ منتقل می‌گردد.

مدلسازی الزام عدم گیرافتادن قطار نرمال در حلقه کنارگذر: کنترل نظارتی بر روی گذر هفت شرایط عدم گیر افتادن قطار عادی در حلقه کنارگذر را بررسی می‌کند. چنانچه منطق عبارت (z<>express) AND (y<>express) درست باشد قطار عادی به مسیر اصلی برمی‌گردد. به عبارت دیگر نشانه normal مکان S(loop) به مکان S۶ منتقل می‌شود.

در شبکه ریلی بسته دو قطار عادی و سریع‌السیر در حرکت هستند که لازم است در شبکه پتری نوع قطار مشخص شود، بنابراین باید برای نشانه‌ها در شبکه پتری صفتی را تعریف کرد تا نوع قطار مشخص شود.

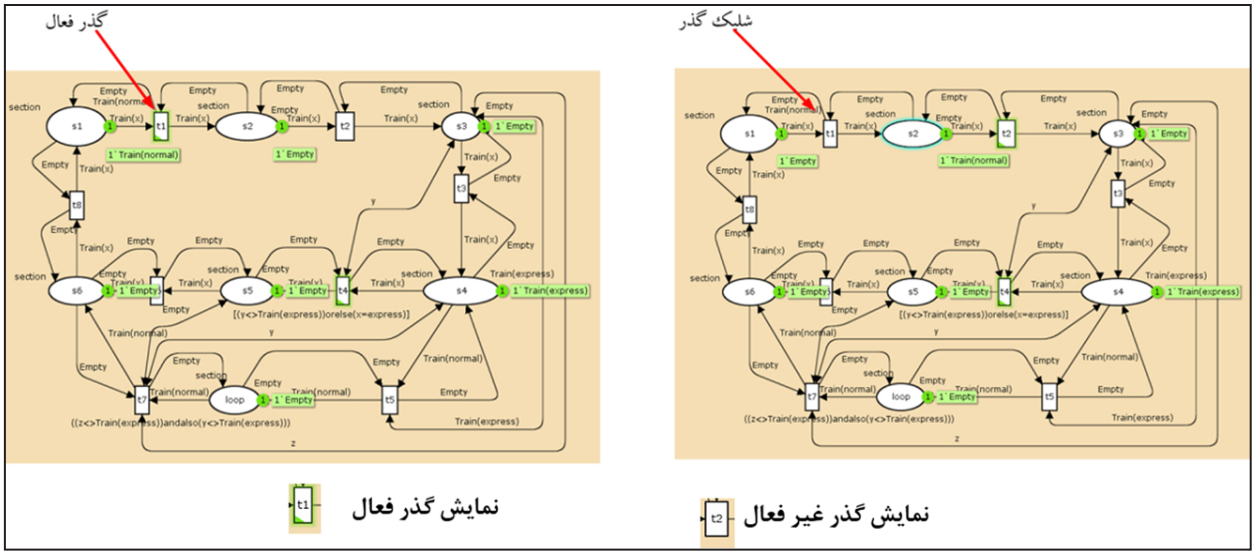
مجموعه قطارها در این حالت { کسپرس و عادی} خواهد بود که در شبکه پتری با { express و normal } نمایش داده می‌شود.از طرفی مکان‌ها که نشان دهنده وضعیت سیرگاه‌ها هستند نیز علاوه بر این مجموعه باید شامل وضعیت خالی یا empty نیز باشند. نشانه گذاری شبکه پتری مدل شده به صورت {(S1,S2,…,S6,S(loop} است که یکی از نشانه‌های normal، express و یا empty بجای مکان‌ها قرار داده می‌شود.

۴. طراحی الزام های شبکه ریلی در شبکه پتری

در ادامه الزامات شبکه ریلی که در بخش قبل بیان شده است توسط شبکه پتری مدل می‌گردد. برای مدل‌سازی ابتدا مفاهیم مربوط به شلیک گذر یا تبدیل وضعیت بلاک ها مدل‌سازی می‌شود.

برای اینکه هر کدام از گذرها آماده شلیک شوند، باید ابتدا در مکان قبل از گذر قطار سریع السیر یا عادی وجود داشته باشد و ثانیاً در مکان بعدی نشانه خالی وجود داشته باشد. برای اجرای این دو مرحله باید دو شرط زیر در شبکه اعمال شود:

شرط یک: برچسب x بر روی کمان‌ها بیانگر نوع قطار است که می تواند عادی یا سریع‌السیر باشد که به قطار اجازه حرکت از مکان قبل از گذر به مکان بعد از گذر بدهد. برای مکان چهارم و گذر پنجم و همچنین مکان کنار گذر و گذر هفتم این برچسب‌ها فقط اجازه حرکت به قطار عادی را می دهند که این با توجه به



شکل ۹. فعال بودن گذر اول در شکل سمت چپ و غیر فعال شدن این گذر پس از شلیک در سمت راست

الزامات بهره برداری است.

شرط دو: برای اینکه شرط خالی بودن نوع نشانه در مکان روبرو بررسی شود کمان کنترلی که نازکتر نمایش داده شده و به گذر وارد می شود با برچسب خالی نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است گذر اول به دلیل وجود نشانه normal در مکان اول و نشان Empty در مکان دوم فعال است. چنانچه این گذر شلیک شود نشانه normal به مکان بعدی منتقل می‌شود و نشانه Empty به این مکان انتقال می‌یابد که این فرآیند در شکل سمت راست شکل ۹ نمایش داده شده است.

همچنین گذر چهارم به دلیل وجود نشانه express در مکان چهارم و نشانه Empty در مکان پنجم فعال است. چنانچه این گذر شلیک شود نشانه express به مکان بعدی منتقل می‌گردد و نشانه Empty به این مکان منتقل می‌گردد.

برای اعمال الزام ایمنی و الزام‌های عملیاتی در شبکه ریلی بسته باید قوانین و مقررات بهره‌برداری در شبکه مدل بررسی گردد.

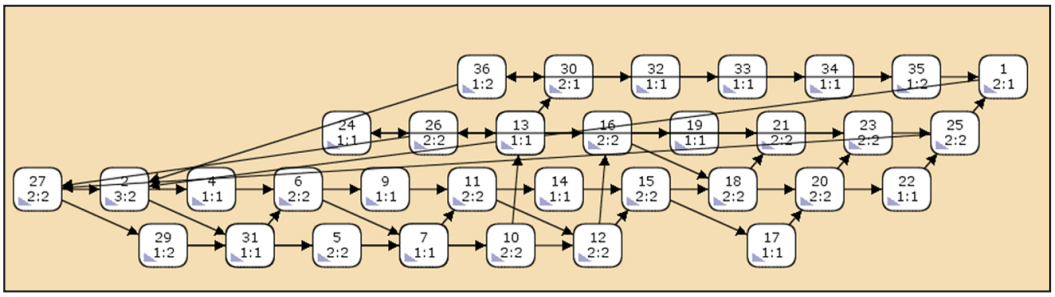
۴-۱ پیاده سازی الزام ایمنی

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. برای این منظور باید دو حالت را در نظر گرفت: ساختار اولیه قطارها در بلاک‌ها و ترتیب بعدی ساختارهای قطار پس از حرکت در شبکه ریلی بسته.

ساختار اولیه قطارها باید به گونه‌ای باشد که در هر سیرگاه تنها یکی از انواع قطارهای سریع‌السیر، عادی و یا خالی وجود داشته باشد. به عبارت دیگر در شبکه پتری، مکان‌ها باید شامل یکی از نشانه‌های {normal,express,empty} باشند. همان گونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، هر کدام از مکان‌ها تنها شامل یکی از نشانه‌های {normal,express,empty} هستند و در حالت اولیه مکانی که بیش از یک نشانه داشته باشد وجود ندارد. از طرفی پس از توالی شلیک گذرها، با توجه به کمان‌های اتصالی، با هر شلیک نشانه‌ها به گونه‌ای جابجا می‌شوند که در هر مکان فقط یک نشانه باشد و این به دلیل مدل‌سازی است که برای این شبکه ریلی بسته در نظر گرفته شده است.

۴-۲ پیاده سازی الزام عدم وقفه

این الزام در شبکه پتری مدل شده با روش‌های مختلفی بررسی میگردد، به عبارت دیگر باید درستی منطق شبکه پتری را از نظر عدم وقفه بررسی کنیم. یکی از این روش‌ها ترسیم درخت دسترس‌پذیری در شبکه پتری مدل شده است. بررسی عدم وقفه به بررسی مدل پویای شبکه مرتبط است و باید نشانه‌ها را در شبکه حرکت داد و نتایج را در هر مرحله بررسی کرد. به عبارت دیگر این مسئله به راحتی با بررسی ساختار مدل قابل دسترسی نیست. در ادامه این فصل با استفاده از نرم‌افزار CPNtools تمام شرایط بررسی خواهد شد. با اجرای مدل شبکه پتری در این نرم‌افزار درخت دسترس‌پذیری مطابق شکل ۱۰ خواهد بود.



شکل ۱۰. فعال بودن گذر اول و چهارم در شبکه پتری مدل شده

۴-۳ پیاده سازی الزام سبقت

مطابق با الزام عملیاتی دو، سبقت زمانی اتفاق می افتد که در بلاک چهار قطار عادی حضور داشته باشد و قطار اکسپرس در بلاک سه در حال حرکت باشد. در این حالت قطار عادی باید به کنارگذر منتقل شود. به عبارت دیگر چنان که در شبکه پتری مدل شده نشانه normal در مکان چهار و نشانه express در مکان سه باشد، می‌بایست گذر پنجم فعال شده و گذر چهارم غیرفعال شود. برای اجرای الزام سبقت مطابق (شکل ۱۱) برای گذرهای چهار و پنج دو کنترل کننده نظارتی تعریف می‌شود. برای گذر چهارم کنترل کننده نظارتی درستی منطق عبارت (x=express) OR (y<>express)را بررسی میکند. اگر در مکان سه نشانه express وجود داشته باشد عبارت y<>express نادرست است و چنان که در مکان چهار نشانه normal وجود داشته باشد، عبارت x=express هم نادرست خواهد بود و عبارت بولی گذر چهار نادرست بوده و این گذر غیرفعال است. در حالی که با وجود نشانه express در مکان سه گذر پنجم فعال می‌شود. در این حالت با شلیک گذر پنجم مطابق شکل ۱۲ نشانه normal در مکان چهار به مکان کنارگذر منتقل می‌شود و نشانه express به مکان چهار منتقل میگردد و با شلیک متوالی گذرها اجازه سبقت به نشانه express داده می شود.

۴-۴ پیاده سازی الزام عدم گیر افتادن قطار عادی در کنارگذر

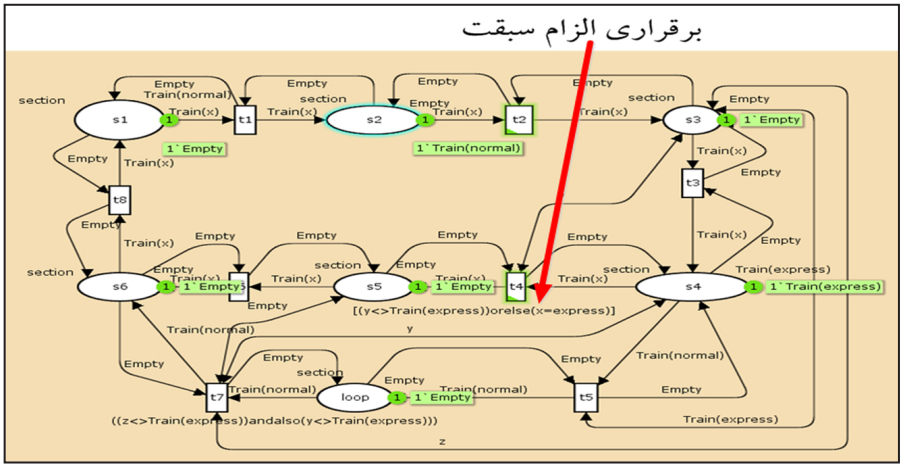
همانطور که بیان شد، بعد از سبقت قطار سریع‌السیر، قطار عادی باید از کنارگذر خارج شده و به مسیر خود در شبکه ادامه دهد. کنترل نظارتی موجود بر روی گذر هفت بررسی می‌کند که آیا در مکان سه و یا چهار نشانه express وجود دارد یا خیر. چنانچه در این دو مکان این نشانه نباشد عبارت بولی (z<>express) AND (y<>express) درست بوده و اگر مکان پنج و شش نیز خالی باشد این گذر فعال شده و اجازه عبور قطار عادی از کنارگذر به مکان شش را می دهد

۴-۵ پیاده سازی الزام بهره برداری از کنار گذر

حلقه کنارگذر فقط باید برای قطار عادی استفاده شود و قطار اکسپرس اجازه ورود به این حلقه را ندارد. برای این منظور بر چسب کمان متصل به گذر چهار فقط normal است و این برچسب اجازه نمی دهد که قطار اکسپرس از مکان چهار وارد کنارگذر شود. با این روش شرط بهره برداری از کنار گذر تضمین می گردد.

۵. نحوه اجرای مدل

شبکه ریلی خط بسته مطابق شکل ۸ با استفاده از شبکه پتری



شکل ۱۱. شرط گذر چهارم برای الزام سبقت

مدل شده است. برای اجرای شبکه پتری و رسیدن به درخت دسترس‌پذیری، به دلیل حجم بالای محاسبات از نرم‌افزار CPNTools استفاده میشود. در این نرم افزار با تعداد متنوع قطارهای عادی و سریع السیر مدل اجرا و تحلیل می شود .

۵-۱ شبکه ریلی شامل قطارهای عادی

در این حالت درستی الزام عدم وقفه شبکه ریلی، با ظرفیت مجاز قطارهای عادی در شبکه ریلی بسته بررسی می‌گردد.

۵-۱-۱ شبکه ریلی شامل دو قطار عادی

چنان که در شبکه ریلی دو قطار عادی در حال حرکت باشند، حالت اولیه در شبکه پتری به صورت (normal,normal,empty,empty,empty,empty,empty) خواهد بود که در این حالت وقفه‌ای در شبکه پتری بوجود نمی‌آید. با توجه به آنکه دو قطار عادی بر روی مسیر اصلی قرار دارد و بر روی مسیر قطار سریع‌السیر نداریم، از مسیر کنار گذر استفاده نشده است. این شبکه بدون و قفه می تواند فعال باشد و هیچ مارک مرده نداریم.

۵-۱-۲ شبکه ریلی شامل سه الی پنج قطار عادی

با توجه به عدم حضور قطار سریع‌السیر بر روی خط، از حلقه کنارگذر استفاده نمی‌شود و بدیهی است که وقفه‌ای در شبکه نباشد. بنابراین چنان که فقط قطارهای عادی در شبکه ریلی بسته در حال حرکت باشند هیچ وقفه‌ای در شبکه نخواهیم داشت.

۵-۱-۳ شبکه ریلی شامل قطارهای سریع السیر

شبکه ریلی بسته که شامل فقط قطارهای سریع‌السیر از یک الی پنج قطار است، با توجه به عدم حضور قطار عادی در شبکه ریلی بسته از مسیر کنارگذر هرگز استفاده نشده است و به همین دلیل وقفه‌ای در شبکه ریلی نخواهیم داشت.

۵-۲ شبکه ریلی شامل قطارهای عادی و سریع السیر

در این حالت درستی الزام عدم وقفه شبکه ریلی، با ظرفیت مجاز قطارهای عادی و سریع‌السیر در شبکه ریلی بسته بررسی میگردد.

۵-۲-۱ شبکه ریلی شامل یک قطار عادی و یک قطار سریع‌السیر

چنان که شبکه پتری شکل۸ شامل یک نشانه express و یک نشانه normal باشد بیانگر آن خواهد بود که یک قطار عادی و یک قطار سریع‌السیر در شبکه در حال حرکت هستند و بنابر نتایج حاصله، وقفه‌ای در شبکه نیست. برای حالت‌هایی که دو الی چهار قطار سریع السیر به همراه یک قطار عادی در شبکه ریلی در حال حرکت باشند نیز وقفه ای مشاهده نشده است.

۵-۲-۲ شبکه ریلی با یک قطار سریع السیر و دو قطار عادی

چنانچه شبکه پتری شکل ۸ شامل یک نشانه express و دو نشانه normal باشد بیانگر آن خواهد بود که یک قطار سریع السیر و دو قطار عادی در شبکه ریلی در حال حرکت هستند. در زمان اجرای برنامه یک وقفه در مرحله ۱۱۳ رخ می دهد. برای حالت‌هایی با حضور یک قطار سریع‌السیر و سه قطار عادی و یا حالت مربوط به یک قطار سریع‌السیر و چهار قطار عادی نیزدر شبکه وقفه خواهیم داشت.

۵-۲-۳ شبکه ریلی شامل دو قطار سریع السیر و دو قطار عادی

شبکه پتری شکل ۸ چنانچه شامل دو نشانه express و دو نشانه normal است مبین آن است که دو قطار سریع السیر و دو قطار عادی در شبکه ریلی در حال حرکت هستند. با اجرای این حالت مدل در مرحله ۲۸ وقفه رخ می دهد. برای حالتی که در شبکه ریلی دو قطار سریع‌السیر و سه قطار عادی باشند نیز وقفه خواهیم داشت.

۵-۲-۴ شبکه ریلی شامل سه قطار سریع السیر و دو قطار عادی

شبکه پتری شکل ۸ با سه نشانه express و دو نشانه normalدر نظر گرفته شود. در این حالت سه قطار سریع السیر به همراه دو قطار عادی در شبکه ریلی در حال حرکت هستند. پس از اجرا در

مرحله ۷۲ وقفه رخ خواهد داد.

۵-۵ جمع بندی تحلیل ها

تحلیل شبکه ریلی به کمک شبکه پتری بر اساس ایمنی و عدم وقفه و تعداد قطارهای عادی و سریع السیر مطابق جدول (۱) می باشد.

- چنانچه در شبکه ریلی فقط یکی از انواع قطارها، عادی یا سریع‌السیر در حال حرکت باشد برای تعداد یک تا پنج قطار وقفه ای نداریم.
- شبکه ریلی با یک قطار نرمال و یک تا چهار قطار اکسپرس ، بدون وقفه است.
- تمام ساختارهایی که شرایط اولیه آن شامل حداقل یک قطار سریع‌السیر و حداقل دو قطار عادی باشد دارای وقفه خواهند بود. این شرایط وقفه مربوط به حالتی است که قطار سریع‌السیر در بلاک سه است و قطارهای عادی در بلاک چهار و بلاک کنارگذر است.
- تقریباً تمام حالت‌هایی که شامل شش قطار بر روی بلاک‌های اصلی است (بلاک کنار گذر خالی است) دارای وقفه خواهد بود. بجز حالتی که قطر سریع‌السیر در بلاک سه باشد و قطار عادی در بلاک چهار باشد.

۶. جمع بندی

در این مقاله یک شبکه ریلی بسته ساده با الزامات ایمنی و بهره‌برداری در نظر گرفته شد که دارای شش سیرگاه اصلی و یک سیرگاه کنارگذر بوده است و دو نوع قطار عادی و سریع‌السیر در آن در حال حرکت هستند. الزامات بهره‌برداری شامل الزام ایمنی، الزام سبقت قطار سریع‌السیر، الزام عدم استفاده از قطار سریع‌السیر از حلقه کنار گذر، الزام عدم ماندگاری همیشگی قطار عادی در حلقه کنار گذر و برگشت آن به خط، الزام پویایی و زنده‌بودن شبکه ریلی بوده است. مشخصات خط و وضعیت سیرگاه‌ها (مکانها در شبکه پتری)، کنش‌های بین سیرگاه‌ها (گذرها در شبکه پتری) و اهداف کنترلی و الزامات بهره‌برداری شبکه ریلی (قوانین گذر مبتنی بر شبکه‌های پتری) مدلسازی گردید. سپس با استفاده از تکنیک‌های موجود، مدل بدست آمده با تعداد مختلف قطار عادی و سریع‌السیر، درخت دسترس‌پذیری و فضاهای حالت مختلف تحلیل گردید و نقاطی که اجرای شبکه ریلی در آن با وقفه مواجه می‌گردد، شناسایی شد. جهت تحقیقات آتی مدلسازی یک شبکه ریلی بسته با بهره برداری همزمان قطارها از یک خط در دو جهت با استفاده از شبکه پتری، اضافه کردن یک تقاطع همسطح با جاده های شوسه به مسیر ریلی و مدلسازی آن با

جدول ۱. نتایج تحلیل مدل با تعداد متنوع قطار عادی و سریع السیر

ردیف	تعداد قطار عادی	تعداد قطار سریع السیر	عدم رخداد وقفه	ایمنی
۱	۱ الی ۵	۰	عدم رخداد وقفه	ایمن
۲	۰	۱ الی ۵	عدم رخداد وقفه	ایمن
۳	۱	۱ الی ۴	عدم رخداد وقفه	ایمن
۴	۲	۱	رخداد وقفه	ایمن
۵	۲	۲	رخداد وقفه	ایمن
۶	۲	۳	رخداد وقفه	ایمن
۷	۳	۱	رخداد وقفه	ایمن
۸	۳	۲	رخداد وقفه	ایمن
۹	۴	۱	رخداد وقفه	ایمن

استفاده از شبکه پتری، مدلسازی حرکت قطارها در یک مسیر ریلی بسته با سرفاصله زمانی مشخص پیشنهاد می‌شود.

۷. پی نوشتها

1. Modelling
2. Petrinets
3. Railway networks
4. Petrinets
5. Places
6. Transition
7. modelling
8. railway network
9. bag theory
10. multiset
11. state
12. action
13. place
14. transition
15. Places
16. Transitions
17. arcs
18. token
19. marking
20. dead
21. state
22. state space
23. reachable states
24. reachability set
25. state space
26. reachability tree

۸. مراجع

- Bago, M., Marijan, S. and Peri, N. (2007) "Modeling controller area network communication", Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics- INDIN, Vienna, Vol. 1, pp. 485-490.

- Bause, Falko and Kritzinger, Pieter, S. (2002) "Stochastic Petri nets: An introduction to the theory, Friedrich,Vieweg,Sohn,Verlag.

- Durmus, M. S. and Söylemez, M.T. (2009) "Railway signalization and interlocking design via automation Petri Nets" ,7th Asian Control Conference, Hong Kong, China, August pp. 27-29.

- Fanti, M. P., 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. and Seatzu, C. (2008) "Modeling and supervisory control of railway networks using Petrinets" , IEEE , Tran ,Conf.Sys.Man,Cybern, vol.5 , pp.431-445

- Guia, A. and Seatzu, C. (2002) "Liveness enforcing supervisors for railway networks using ES^{2}PR Petri nets," in proc. WODES02 :6thint , work discrete event syst , zarafoza , Spain, Oct , pp. 55-60

- Hartmut, Ehrig, Gabriel, Juhas, Julia, Padberg and Grzegorz, Rozenberg(2002) "UnifyingPetriNets", Springer

- Hei, X.,Takahashi, S. and Nakamura, H. (2008) "Toward develeoping a decentralized railway signalling

system using Petri Nets," IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 851-855, September 21-24, Chengdu, China

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

- Hagalisletto, A. M., Bjork, J., Yu, I. C. and Enger, I. C. (2007) "Constructing and refining large-scale railway models represented by Petri Nets," IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, vol. 37, no. 4, pp. 444-460.

- Jensen, K., Kristensen, M. L. and Wells, L. (2007) "Coloured Petri Nets and CPN tools for modelling and validation of concurrent systems", International Journal on Software Tools for Technology Transfer, Vol. 9, No. 3-4, pp. 213-254.

- Janczura, C. W. (1998) "Modeling and analysis of railway network control logic using colored petri nets" ,Ph.D.dissertation, University of South Australia, Australia.

- Kordic,V.(2008) "Petri net theory and applications", Wiley Interscience

- Li, Z. and Zhou, M. C. (2004) "Elementry siphons of Petrinets and their applications to deadlock prevention in flexible manufacturing systems," IEEE trans syst.,Man, Cybern.,Vol.34, No.1, pp.38-51.

- MoenHagalisletto, A. and Yu, I. C. (2004) "Large scale construction of rail-road models from specifications" inproc.IEEEint.Conf.Sys.Man,Cybern, Den Haag, Holland, pp.6216-6219.

- MoenHagalisletto, A. and Yu, I. C. (2004) "Large scale construction of rail-road models from specications , "inProc . IEEE Int .Conf .Syst .,Man, Cybern ., DenHaag,Holland , pp.6212–6219.

- Park, J. and Reveliotis, S. A. (2002) "Liveness – enforcing supervision for resource allocation systems with uncontrollable behavior and forbidden states , " IEEE Trans , Vol 18 , No . 2, pp. 234-240.

- Pawlewski, P. (2010) "Petri nets applications" n.p.

- Reveliotis, S. A. (2000) "Conflict resolution in AGV systems " , IIE Trans, Vol 32, No 7, pp. 647-659

-Ren, X. and Zhou, M. C. (1995) "Tactical scheduling of rail operation: a petrinet approach" inproc.IEEE-Int.Conf.Sys., Mancybern .,Vancouver, BC,Canada, pp.3087-3092

- Wil, M. P.van,der and Aalst, KurtJensen (2009) "Transactions on Petri Nets and other models of concurrency II", Springer.

- Wolfgang, Reisig and Grzegorz, Rozenberg (1998) "Lectures on Petri nets I Basic models",Springer.

- Wolfgang, Reisig and Grzegorz, Rozenberg (1998) "Lectures on Petri nets II applications", Springer.

- Wolfgang, Reisig (1985) "Petri Nets: An introduction", Springer.

- Wuand, N.Q. and Zhou, C. (2004) "Deadlock modeling and control of auto-mated guided vehicle systems", IEEE Trans, Vol. 9, No.1, pp.50–57.