Archive of SID.ir

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره اول، شماره ۷۸، بهار ۱۴۰۳

طراحی و مدل‌سازی شبکه‌ریلی (خط ۷ متروی تهران) با ایجاد مسیرسازی جهت افزایش سرویس‌دهی خط و تضمین ایمنی به روش شبکه‌های پتری

مقاله علمی – پژوهشی

محمدعلی صندیدزاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
هاجر قاسمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۳– پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵
صفحه ۹۲-۷۵

چکیده

این مقاله به مدل‌سازی شبکه ریلی با تکنیک تفکیک مسیر به منظور مسیرسازی وافزایش سرویس‌دهی خط با تضمین ایمنی که امری مهم در صنعت حمل و نقل ریلی بشمار می‌آید، پرداخته است. مقاله با بکارگیری روش‌های رسمی، مدلی جهت افزایش ظرفیت خط با استفاده از روش شبکه‌های پتری سطح بالا (HLPN) ارائه کرده است. طراحی مدل با نرم‌افزار CPNTools صورت گرفته است. دلیل استفاده از این نرم‌افزار پشتیبانی از شبکه‌های سلسله مراتبی است، که اصول اساسی این کار محسوب می‌شود. استفاده از این نرم‌افزار با عملیاتی شدن سناریوهای مختلف، ارزیابی و تأیید مدل با سرعت بالا را امکان‌پذیر کرده است. مقاله به طور عمده بر روی طراحی افزایش سرویس‌دهی خط با "تک‌مسیرهای ایجاد شده" به کمک شبکه‌های سلسله مراتبی در زمینه حمل و نقل ریلی شهری متمرکز است. سه ایستگاه از خط ۷ متروی تهران به عنوان طرح مسیر انتخاب، که با ایجاد "مسیرسازی" و تکنیک "تفکیک مسیرهای متوالی خط"(تک مسیرها) از سیگنال ابتدای تک‌مسیر مطلوب به سیگنال تک‌مسیر بعدی به ترتیب و به طور منظم، افزایش ظرفیت و بهره‌برداری از خط با تضمین ایمنی امکان‌پذیر شده است. با نمایش رفتار پویای مدل، توسط نرم‌افزار مذکور نیز، این ادعا اثبات شده است که مسیرسازی جهت افزایش سرویس دهی بدرستی صورت گرفته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد، مدل شبیه-سازی شده در مقابل خنثی‌سازی مدل‌های زمانی، کمک و افزایش سرویس‌دهی خط را با رعایت ایمنی تضمین کرده است.

واژه‌های کلیدی: تضمین ایمنی، شبکه‌های پتری و سلسله مراتبی، افزایش سرویس‌دهی خط، HLPN

۱-مقدمه

روش رسمی نوعی مهندسی نرم‌افزار است و هدف آن افزایش قابلیت اطمینان سیستم با طراحی سیستم بدون خطا است. به عبارتی دیگر استفاده از روش‌های رسمی در تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان، قبل از عملیاتی شدن هر سیستم کمک شایانی کرده است. در این مقاله از نسخه ۴,۰,۱ نرم‌افزار CPNTools به عنوان ابزار روش بکار گرفته شده، استفاده شده است. از شبیه‌سازی با مدل HLPN [1] می‌توان در تحلیل سیستم‌های ریلی (آزمایش زیرساخت‌ها، تجزیه و تحلیل جدول زمانی و ظرفیت خط، تأخیر قطار و غیره) (Milinković, Mašek, Vesković, Marković and Belošević, 2016)، و بسیاری از زمینه‌های صنعت حمل و نقل ریلی در بخش سیگنالینگ از شبکه‌های پتری به منظور کنترل و مدیریت ترافیک با شبکه‌های با درنظر گرفتن تأخیر هر قطار در هر ایستگاه (Enache, Al-Janabi and Letia, 2018)، زیر ساخت‌های راه‌آهن (Rama and Andrews, 2015)، پل‌های راه‌آهن برای حمایت از تصمیم‌گیری‌های تعمیر و نگهداری (Le, Andrews and Fecarotti, 2017)، جدول کنترل سیستم سیگنالینگ راه‌آهن (Vanit-

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

(Anunchai, 2010)، طراحی و تحلیل ایمنی سیستمERTMS سطح ۳ با ترکیب دو روش Event-B و شبکه‌های پتری‌رنگی (Boudi, Wakrime, Dutilleul and Haloua, 2019)، اعتبارسنجی اجزای ERTMS براساس الزامات عملکردی برای کاهش هزینه‌های اعتبارسنجی (Jabri, Bourdeaud'huy and Lemaire, 2010)، مدیریت ارتباطات سیستم ERTMS سطح۲ (El Amraoui and Mesghouni, 2014)، تجزیه و تحلیل تجهیزات داخلیCTCS-3 با سطح ایمنی٤ (Jingjia and Tao, 2020)، شناسایی خطا جهت تأیید عملکرد ایمنی در سیستم کنترل قطار(CBTC)(Lin and Xu, 2020) ، طراحی و بهینه‌سازی کنترل قطار(DCS) مبتنی بر ارتباطات داده T2T (Liang, Zhao, Wang and Zhang, 2020)، امکان شناسایی خطا در برنامه‌های زمانی حرکت قطار (Wang, Tong and Wang, 2020)، پیاده‌سازی منطق کنترل ایستگاه‌های راه‌آهن به همراه طراحی تجهیزات کنارخط (Li, Tong and Guo, 2019)، طراحی یک نمونه شبکه راه‌آهن با استفاده از این اتوماسیون برای تشخیص خرابی‌های تجهیزات سیستم اینترلاکینگ به منظور افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان (Yildirim, Durmuş and Söylemez, 2010) ، طراحی تجهیزات و اعتبارسنجی سیستم اینترلاکینگ (Üstoğlu, Töpel Durmus, Tsarev and Zhigalov, 2019) ، تأیید خصوصیات ایمنی راه‌آهن با استفاده از شبکه‌های سلسله مراتبی برای تأیید ایمنی و ارزیابی ظرفیت (Iliasov, Lopatkin and Romanovsky, 2014)، مدیریت و ارزیابی ظرفیت مسیر موجود در یک ایستگاه با برنامه‌ریزی جدول زمانی (Burkolter, 2005)، کنترل قطار با توجه به موقعیت قطارهای دیگر، برای جلوگیری از برخورد و قرار گرفتن در بن‌بست است که در آن قوانین کنترل توسط مکان‌های نظارتی اجرا شده است (Cazenave, 2022)، همچنین برای جلوگیری از برخورد به جهت تضمین اصول ایمنی در شبکه‌های ریلی کوچک و پیچیده با استفاده از یک کلاس جدید از شبکه پتری زمان‌دار بنام جستجوی نشانه‌های قابل دسترس مدل شبکه‌های پتری که براساس آن روش جلوگیری از برخورد پیشنهاد شده است (Luo,۲۰۲۱)، ساخت یک مدل کنترل حلقه بسته با سنتزکردن براساس شبکه‌های پتری برای تضمین اجتناب از برخورد و کنترل ترافیک (Toguyeni,2021)، به دلیل امکان نمایش رفتار پویای مدل، جهت مدل‌سازی اشاره کرد. در ارتباط با مقوله‌ی ظرفیت خط و مطالعات اخیر می‌توان گفت، استفاده از روش‌های رسمی از جمله شبکه‌های پتری به طور کامل در دسترس جامعه تحقیق قرار نگرفته است. مورد (Burkolter, 2005)مرتبط با این کار است که در آن چهارچوب مدل با برنامه‌ریزی جدول زمانی است و از شبکه‌های سلسله مراتبی که از مزیت کاهش پیچیدگی سیستم برخوردار است، استفاده شده است. ما همچنین علاوه بر بهره‌برداری بهینه از خط، با درنظر داشتن قوانین و تضمین ایمنی، که تأثیر بسزایی در اجرای این هدف دارد، به شبیه‌سازی آن پرداخته‌ایم. مدل شبیه‌سازی شده بصورت سلسله مراتبی در دو صفحه مجزا اما مرتبط، جهت کنترل ظرفیت خط به همراه تضمین ایمنی در برابر برخورد قطارها با یکدیگر طراحی شده است. در صفحه اول ابتدا شبکه مترو به کمک ابزارهای موجود در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است و صفحه دوم که با صفحه اول (شبکه مترو) در ارتباط است با تفکیک مسیرهای متوالی برای سهولت‌کار جهت مسیرگیری پرداخته شده است.

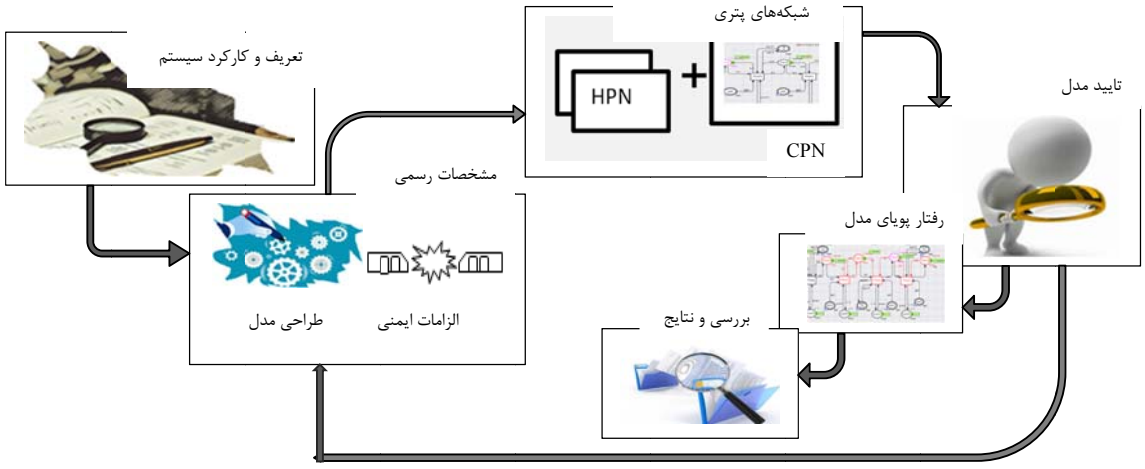
۲- پیشینه تحقیق

با توجه به تحقیقات انجام شده، نتایج نشان می‌دهد علی رغم استفاده از روش‌های رسمی که در بخش‌های مختلف صنعت حمل و نقل ریلی جایگاه گسترده‌ای پیدا کرده است، در خصوص مبحث بهره‌برداری و ظرفیت خط مطالعات کمتری صورت گرفته است. همین عامل سبب شد تا گامی در جهت توسعه تکنیک‌ها و ابزارهای مدل‌سازی با روش رسمی برای ارتقا ظرفیت خطوط مترو با تضمین ایمنی برداریم. برای دستیابی به هدف کلی، اولین مورد ایجاد یک زبان خاص با دامنه گرافیکی بصری برای خط مترو با پشتیبانی از ابزار مرتبط است. مورد دوم شناسایی و تأیید الگوی طراحی برای بهبود ظرفیت با تغییر در طراحی و طرح‌بندی مسیر، که اصول و قوانین سیر و حرکت مترو بود. پیشرفت‌های علمی در زمینه دستیابی به این اهداف، در ایجاد فنآوری در ابزار روش‌های رسمی برای استدلال دقیق در مورد تأیید مدل‌های مترو و پشتیبانی سیستم‌های مترو و راه‌آهن است.به طور خاص، این روش‌ها و ابزارها به مطالعه ایمنی و ظرفیت مترو به روش یکپارچه مورد نیاز هستند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در این بخش سعی بر این است تا دیدگاهی کلی از مراحل طراحی مدل و چگونگی ارتباط بخش‌های مختلف با یکدیگر بیان شود، که در شکل ۱ چهارچوب کلی از مدل و مراحل انجام کار آورده شده است. با توجه به روش بکار گرفته شده در این مقاله، لازم دانستیم تکنیک استفاده از روش به لحاظ کارکرد را توضیح دهیم. شیوه‌ی کار روش‌های رسمی به اینصورت است که بخشی از چرخه حیات در بحث ایمنی سیستم‌ها را اجرا می‌کند. در مراحل اولیه کار باید با مفاهیم، تعریف و شرایط کارکرد سیستم آشنایی داشت و سپس مشخصات رسمی که بخش الزامات و طراحی مدل را شامل می‌شود، مشخص گردد. هدف از مشخصات رسمی، به تصویر کشیدن الزامی که توسط سیستم و طراحی آن که مطابق با چنین الزامی است انجام می‌شود. با شبیه‌سازی مدل CPN طرح مسیر شبکه مترو که در بخش‌های بعد به طور مفصل به آن پرداخته شده است، به کمک شبکه‌های سلسله مراتبی که توسط نرم‌افزار قابل پشتیبانی است، طراحی گردید. مدل CPN طرح مسیر باید تحت یک آزمون قرار گیرد. آزمونی که مورد بررسی قرار گرفته شد، این است که "آیا طراحی و الزامات آزمون در قالب مرحله تأیید تعریف می‌گردد، که با استفاده از تکنیک بررسی مدل انجام شده است. این تکنیک با تحلیل رفتار پویای مدل مورد تأیید قرار گرفت. همچنین در این مرحله از کار، مدل کلی به گونه‌ای طراحی گردید که در صورت وجود مشکل در رفتار، قابلیت تغییر و اصلاح وجود داشته باشد و پس از آن مراحل بررسی باید به طور مجدد تکرار گردد. در نهایت علاوه بر بررسی رفتار پویای مدل، با انتخاب یکی از گزارش‌هایی که از این نرم‌افزار قابل استخراج است، رفتار مدل به چالش کشیده شد، تا تأیید مدل با آن مقایسه گردد و نتیجه مطلوب اثبات می‌شود.



شکل ۱. چهارچوب کلی مدل

۳- شبکه‌های پتری

۳-۱- شبکه‌های پتری معمولی

شبکه‌های پتری معمولی از چهارتایی $PN=(P, T, A, \Sigma)$ تشکیل شده است، که به شرح زیر است:

۱. P : شامل مجموعه‌ای از مکان‌ها

۲. T : شامل مجموعه‌ای از گذرها

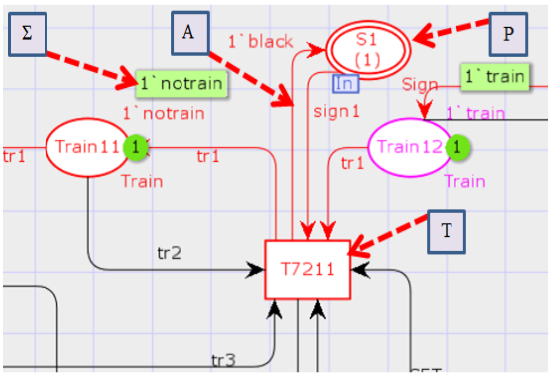
۳. A : شامل مجموعه‌ای از کمان‌ها

٤. Σ : شامل مجموعه‌ای از توکن‌ها

این چهار عنصر از عناصر پایه در شبکه‌های پتری است، با بیان معادل آنها برای مدل‌سازی اجزای شبکه ریلی که، مکان‌ها (P)، شامل جایگاهی است که نشانه (حضور قطار و عدم حضور قطار) در آن استقرار می‌یابد. گذرها (T)، مجوز عبور نشانه (قطار) را از یک مکان به مکان دیگر صادر می‌کند. کمان‌ها (A)، پل‌های ارتباطی مکان‌ها با یکدیگر هستند، که امکان حرکت از مکان به گذر و از گذر به مکان را فراهم می‌کند. نشانه‌ها (Σ)، نیز تعداد توکن‌های (نوع قطار) موجود در مکان را شامل می‌شود. در برخی منابع نشانه را به صورت رنگ‌های متفاوت به این منظور درنظر می‌گیرند. شکل ۲ تصویری از این اجزا در فضای نرم‌افزار CPNTools را نشان می‌دهد، که با مربع‌هایی با کادر آبی رنگ به عنصر متناسب اشاره شده است.

Archive of SID.ir

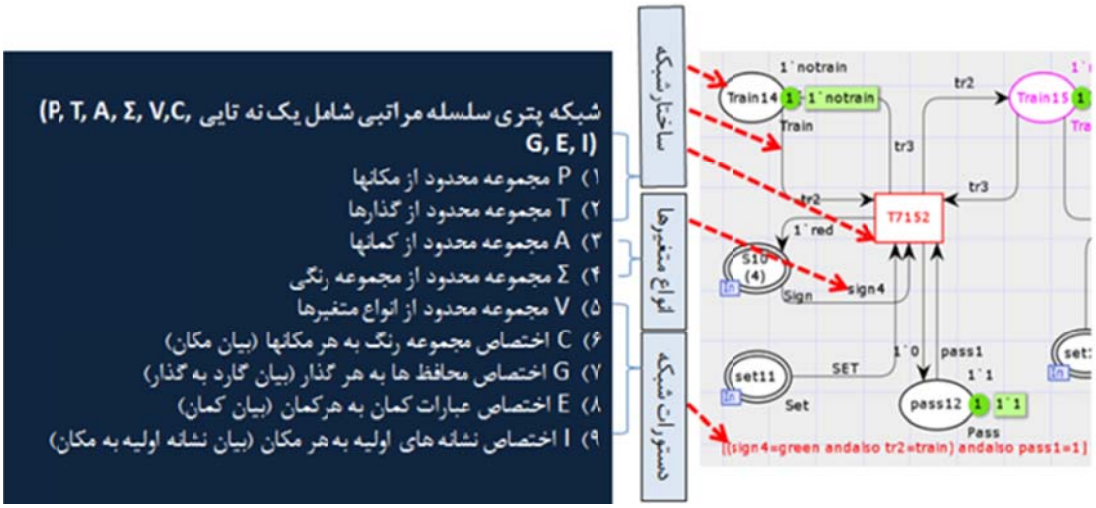
Archive of SID.ir



شکل۲. عناصر اصلی شبکه‌های پتری

۳-۲- شبکه‌های پتری سطح بالا

شبکه‌های پتری سطح بالا از آن دسته ابزاری هستند که می‌توانند سیستم‌های پیچیده را مدل‌سازی کرده و نمایش گرافیکی خوبی از مدل را ارائه دهد. (Milinković Milinković, Mašek, Vesković, Marković, and Belošević, 2016) شبکه‌های پتری سطح بالا (HLPN) به ویژگی‌های زمانی، رنگی، تصادفی و سلسله مراتبی اطلاق می‌گردد. شبکه‌های ریلی با ساختار سلسله مراتبی به صورت سطح‌بندی مشخص می‌شود، که در آنها سطح اول ساختار کلی سیستم و سطح دوم ساختار داخلی هر سیستم نشان داده می‌شود(Sedykh and Demakhin, 2020). شبکه‌های سلسله مراتبی از یک نه تایی تشکیل شده است، که شامل سه بخش است: بخش اول ساختار شبکه، بخش دوم انواع متغیرها و بخش سوم شامل دستورات شبکه می‌شود، که بر روی عناصر به منظور کنترل‌های نظارتی بکار رفته است. در شکل ۳ دستوراتی که به عنوان کنترل نظارتی بکار گرفته شده است، علاوه بر گذارها بر روی کمان‌ها نیز تعریف شده است. به عنوان مثال، دستوری که در شکل۳ می‌بینید، مربوط به گذار T7152 است (که به رنگ قرمز مشخص شده است). این دستور بیان می‌دارد تحت چه شرایطی گذار فعال شود.



شکل۳. معرفی اجزا و تعریف رسمی شبکه‌های پتری HLPN

٤- طرح مسیر

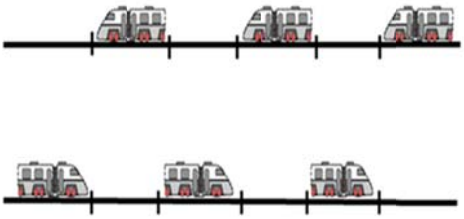
هر شبکه ریلی با توجه به مدل‌های سیر عمومی بیان شده در (Wang, Ma, Goverde and Wang, 2015) برای خطوط مترو و راه‌آهن، متفاوت است. از آنجایی که سیر در خطوط مترو فقط و فقط در یک جهت تعریف شده است، بنابراین می‌توان این مدل سیر و حرکت را معادل یک مدل ماژول با تراک‌های تک مسیره، همانند شکل٤ به تصویر کشید. در بخش۷ نیز برای شبیه‌سازی مدلCPN، **از این قانون استفاده شده است**. برای مدل‌سازی شبکه ریلی ابتدا سه ایستگاه از خط ۷ متروی تهران به عنوان طرح مسیرانتخاب شد، که در شکل۵ آمده است. در این طرح فلش‌ها جهت مسیر قطار را نشان می‌دهند. مسیر بالا به پایین با رنگ قرمز، شامل مجموعه تراک‌های (بخش‌های) T1 و مسیر پایین به بالا با رنگ سبز، مجموعه تراک‌های T2 نشان داده شده است، و مجوز ورود به این بخش‌ها که توسط گذارهایی با همین نامگذاری‌ها انجام

Archive of SID.ir

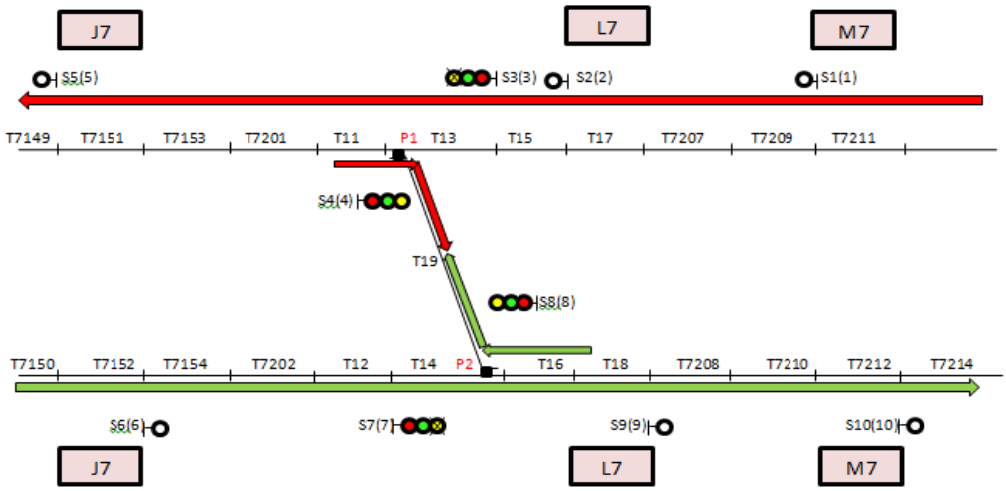
Archive of SID.ir

شده است، صادر می‌گردد. شماره قطار حاضر در مکان را با t1 تا t24 درنظر گرفته می شود، S1 تا S10 نشانگر چراغ‌های موجود در خطوط مترو است، که از تک نما (روشن یا خاموش(DS))[۲]، دو نما (قرمز و سبز) و سه نما (زرد، سبز و قرمز) در آن استفاده شده است. مجموعه سوزن و ایستگاه‌های موجود در این مسیر به ترتیب با P و S معرفی شده‌اند. لیست موارد بیان شده در زیر آمده است.

T1= {T7213, T7211, T7209, … , T7149}
T2= {T7150, T7152, T7154, … , T7214}
t1- t24= {train1, train2, train3, … , train24}
S1- S10 = { Signals| S1, S2 , S5, S6, S9,
S10=DS ;
S3, S4, S7, S8=Signal Lamp}
P= {p1, p2}
S= {J7, L7, M7}.



شکل٤. ماژول تک مسیره



شکل۵. طرح مسیر سه ایستگاه از خط ۷ متروی تهران

مدل‌سازی تفکیک مسیرهای متوالی

یکی از مزیت‌های جالب و کارآمد در طراحی با شبکه‌های سلسله مراتبی کاهش پیچیدگی در مدل‌سازی سیستم با تفکیک مدل ایستگاه‌ها و سهولت ارتباط‌گیری اپراتور (و یا مسئول شبکه که وظیفه مجوز حرکت قطار را به راهبر صادر می‌کند) با خطوط ریلی از روی نرم‌افزار است. مدل طراحی شده در قالب شبکه‌های سلسله مراتبی در ارتباط با ظرفیت خط به اینصورت است که ابتدا مطابق با طرح مسیر نشان داده شده در شکل۵، جداول ۱ و ۲ خصوصیات عملکردی مسیرهایی که اجازه عبور قطار را می‌دهند، تعیین می‌کند. لذا از آنجایی که تنها هدف تفکیک مسیرهای متوالی است، از درنظر گرفتن سایر خصوصیات مانند (مسیرهای مخالف، درگیر، تعداد تراک‌های اشغال، آزاد و غیره) که برای خطوط متروی تهران درنظر گرفته شده است، صرف‌نظر شد زیرا از بحث این مقاله خارج است و کفایت می‌کند. از این رو جهت تفکیک مسیر از سیگنال‌های موجود در طرح مسیر استفاده شد. نام‌گذاری مسیرها به اینصورت که هر سیگنال می‌تواند به عنوان نقطه شروع (Sx) و نقطه پایان (Fy) در نظر گرفته شود. سپس توسط اپراتور با انتخاب هر مسیر از جداول شماره ۱ و ۲، مجوز مسیر موردنظر به قطار صادر می‌گردد. برای هر مسیر انتخاب شده x={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10} اعداد انتخابی نقاط شروع و

Archive of SID.ir

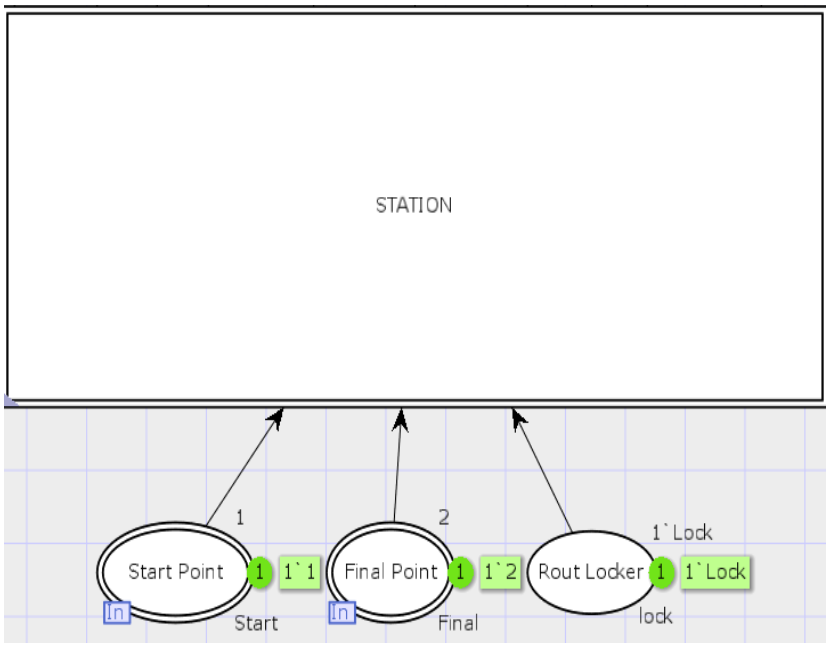
Archive of SID.ir

y={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10} نیز اعداد نقاط پایان برای مسیرها تعریف شده‌اند. به طوری که x≠y (به عنوان مثال مسیر (S1 → F1 تعریف نشده است. ارتباط اپراتور جهت وارد کردن هر مسیر دلخواه را با طراحی صفحه‌ای که در آن هیچ اطلاعاتی جز اعداد نقطه شروع و پایان نیست انجام دادیم. این صفحه تحت عنوان صفحه اصلی نام‌گذاری گردید، که اپراتور قادر به مسیرگیری مسیر مورد نظر است، همانطور که در شکل ٦ (صفحه دوم) قابل رویت است فقط و فقط اپراتور با وارد کردن اعداد از ۱ تا ۱۰ برای نقاط شروع و پایان می‌تواند مجوز عبور قطار را صادر کند. مسیرهای انتخابی باید با جداول ۱ و ۲ مطابقت داشته باشد.

شاید در ذهن شما این سوال ایجاد شود "اگر بخواهیم برای مثال، مسیر S2-F5 را به عنوان مسیر مورد نظر انتخاب کنیم آیا امکان‌پذیر خواهد بود یا خیر؟". که این توقعی طبیعی است و در پاسخ به این سوال باید خاطر نشان کرد با توجه به هدف مدل‌سازی که بهره‌برداری از خط است، تفکیک مسیرها انجام گرفته است و در صورتی که بتوان این مسیر را عملیاتی نمود، به طور قطع با کاهش ظرفیت و سرویس‌دهی خط مواجه خواهیم شد، به دلیل اینکه مسیر مابین این مسیر(S3-F5) حذف خواهد شد، که خود موجب نقض هدف و ایده این مقاله است. از این رو مسیرگیری باید با "ترتیب و به طور منظم" صورت گیرد تا بتوان از حداکثر ظرفیت خط به همراه تضمین ایمنی بهره برد. لازم به ذکر است که در مرحله اول اپراتور با انتخاب اولین مسیر در هر خط شروع به کار می‌کند، و بلافاصله بعد از هر مسیرگیری حرکت قطار(رفتار دینامیک مدل) در شبکه ایستگاها (مدل طرح مسیر) برای وی قابل مشاهده است. این روند نمایش اساس کار شبکه‌های سلسله مراتبی است، همچنین قابلیت برگشت از صفحه شبکه ایستگاه به صفحه اصلی تحت کنترل اپراتور است.

مدل CPN طرح مسیر ایستگاه

طرح مسیر نشان داده شده در شکل ۵ به عنوان شبکه ایستگاه معرفی می‌گردد، که زیر شبکه‌ی شبکه اصلی است. با توجه به موارد ذکر شده در بخش۵ که اجزای تشکیل دهنده‌ی خط در آن لیست شده و همچنین مشخصات جداول ۱ و ۲، مدل CPN شبکه ایستگاه به همراه تجهیزات کنارخط از جمله چراغ سیگنال، مدارراه و ماشین‌سوزن شبیه‌سازی شده است. در این مقاله برای طراحی مدارراه از (Bjork and Andres, 2005) استفاده شد تا اشغال و آزاد بودن تراک‌های جلو برای قطار مشخص شود. شکل ۷ مدل CPN شبکه ایستگاه که شامل سه ایستگاه از خط ۷ متروی تهران است را نشان می‌دهد.



شکل٦. مدل CPN شبکه اصلی جهت مسیرگیری

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول۱. نام‌گذاری و تفکیک مسیرها

مسیر بالا به پایین					
تراک‌ها	وضعیت سوزن		وضعیت سیگنال	نقطه پایان	نقطه شروع	شماره مسیر
	P2	P1				
T7211,T7209,T7207,T17	–	–	روشن	F2	S1	۱
T17,T15	–	–	روشن	F3	S2	۲
T15, T13, T11,T7201,T7153,T7151	–	–	سبز	F5	S3	۳
T7151,T7149,T7150,T7152	–	–	روشن	F6	S5	٤
T14,T16, T18,T19 ,T11, T13	نرمال*[1]	معکوس	زرد	F9	S4	٥

جدول۲. نام‌گذاری و تفکیک مسیرها

	مسیر پایین به بالا					
تراک‌ها	وضعیت سوزن		وضعیت سیگنال	نقطه پایان	نقطه شروع	شماره مسیر
	P2	P1				
T7152,T7154,T7202,T12	–	–	روشن	F7	S6	۱
T12,T14,T16, T18	–	نرمال	سبز	F9	S7	۲
T18,T7208,T7210,T7212	–	–	روشن	F10	S9	۳
T7212,T7214,T7211	–	–	روشن	F1	S10	٤
T11, T14, T16, T19, T7201, T7153,T7151,T7149	معکوس	نرمال*[1]	زرد	F5	S8	٥

*[1]: در خطوط مترو قطار به خط دیگر(به استثنای مواقعی که قطار دچار نقض فنی شده) تغییر مسیر نمی‌دهد. در این تک‌مسیرها تراک‌های نامبرده، از تراکی که در آن قطار دچار مشکل شده، درجدول قید شده است.علاوه بر این سایر تراک‌های تک‌مسیر را شامل می‌شود.

تکنیک تأیید مدل

ابزار محاسباتی متعددی وجود دارد که به طور خودکار روند بررسی مدل را انجام می‌دهند. این ابزار، به عنوان چک کننده مدل شناخته شده‌اند. جهت تایید طراحی شبکه ریلی، مدل شبیه‌سازی شده باید مورد آزمایش قرار گیرد. به عبارتی دیگر در روش‌های رسمی منظور از تأیید رسمی، این است که آیا طراحی و الزامات سیستم با استفاده از تکنیک مشخصات رسمی تهیه شده‌اند.

به طور عمده دو نوع تکنیک تأیید رسمی وجود دارد. یکی روش بررسی مدل و دیگری روش اثبات قضیه است. بررسی مدل روشی است برای تأیید سیستم‌های موازی و همزمان. از آنجایی که CPNTools نرم‌افزاری است که با مفهوم و منطق روابط ریاضی سروکار دارد و بطور کلی طراحی را به طور گرافیکی نمایش می‌دهد، از این رو ما نیز از روش بررسی مدل جهت تست استفاده نموده‌ایم. مدل با بررسی دینامیک (رفتار پویای) شبکه‌های پتری و نمایش نمودار دسترس‌پذیری قابل اثبات است. برای یک شبکه پتری مارک شده (دارای نشانه) پنج‌تایی PN= (P, T, A, W, X) درنظر گرفته شده است که PN= (P, T, A, W) گراف شبکه و X نشانه اولیه‌ی مجموعه مکان‌ها است. همچنین فضای حالت یک شبکه پتری با n مکان برابر با $X = N^n$ است، به طوری که $X = [x(p1), x(p2), \ldots, x(pn)] \in N^n$ ، یک ماتریس $1 \times n$ است.

تعریف ۱: فعال شدن گذارها

یک گذار $tj \in T$ در یک شبکه‌پتری اگر $x(pi) \geq w(pi, tj)$ (w وزن کمان) فعال می‌شود و برای همه $pi \in I(tj)$ است.

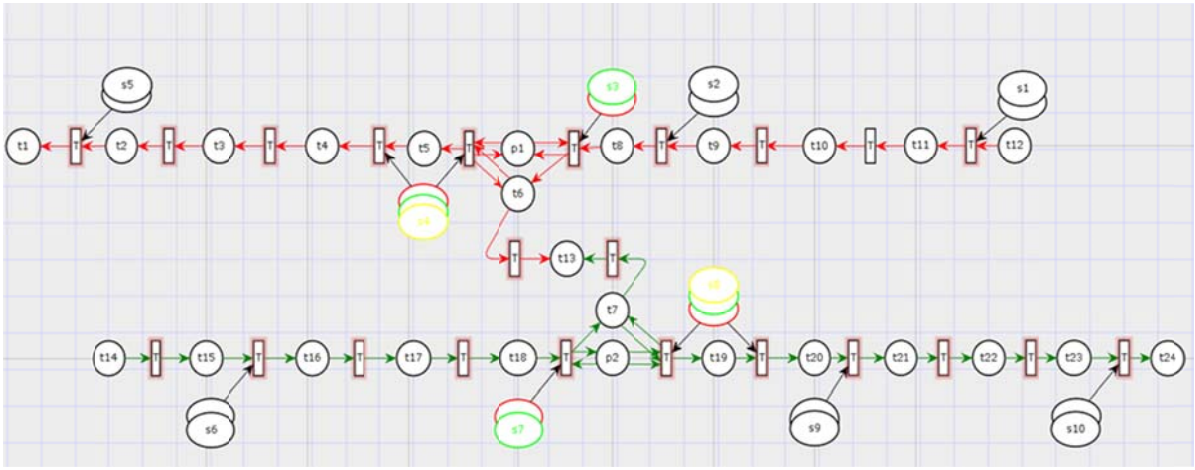
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تعریف ۲: دینامیک شبکه پتری

با برقراری تعریف ۱، فضای حالت جدید برابر $x' = f(x, tj)$ برای شبکه خواهد بود، در اینصورت به طور کلی برای هر تعداد نشانه در هر مکان با فعال شدن گذارهای موجود در شبکه رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$x'(pi) = x(pi) - w(pi,tj) + w(tj,pi)\ ,\ i = 1, \ldots ,n$$



شکل۷ . مدل CPN طرح مسیر در محیط نرم‌افزار

تعریف ۳: بردار حالت کلی

دسترسی به حالت‌های کلی در یک شبکه‌پتری مطابق با رابطه $x' = x + uA$ امکان‌پذیر است، که در آن u برداری است که توسط آن (با عملیات شلیک‌کردن هر گذار در هر مرحله) سایر حالت‌ها قابل محاسبه است. A نیز یک ماتریس m×n است که به صورت زیر بدست می‌آید.

$$A(a_{ji}) = \begin{bmatrix} a_{11}\ a_{12}\ a_{13}\ \ldots\ a_{1n} \\ a_{21}\ a_{22}\ \ldots\ \ldots\ a_{1n} \\ . \\ . \\ . \\ a_{m1}\ \ldots\ \ldots\ a_{mn} \end{bmatrix},$$

$$a_{ji} = w(t_j\ , p_i) - w(p_i\ , t_j)$$

نمایش رفتار پویای شبکه

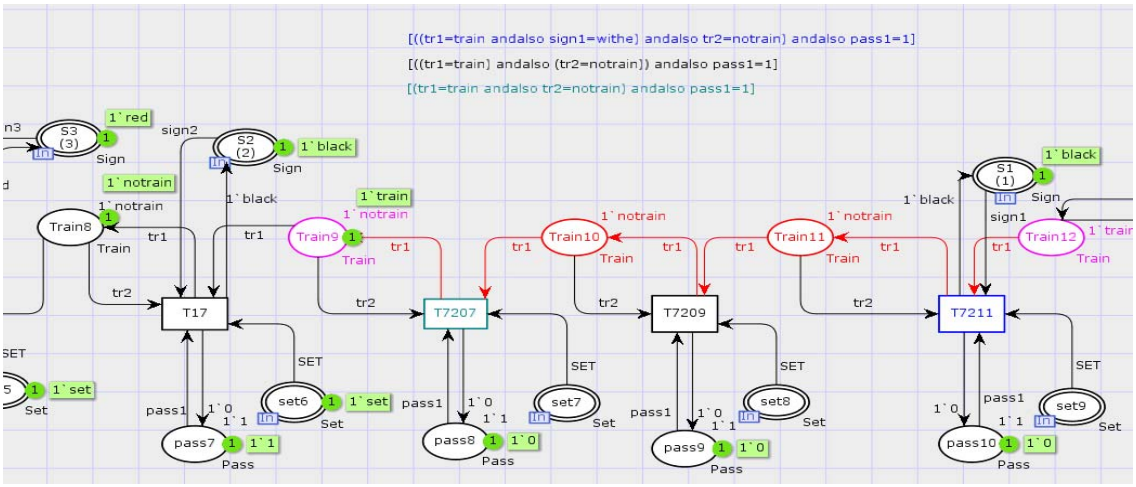
با توجه به تعاریف ۱، ۲، ۳ انتظار می‌رود که مدل ما نیز چنین رفتار پویایی را اجرا نمایید. از بین مسیرهای جداول ۱ و ۲، مسیر S1-F2 ، S7-F9 و S6-F7 که در شکل ۸ نشان داده شده است. این سه تک‌مسیر مورد بررسی قرار داده شد، تا مورد تأیید واقع گردد. مابقی تک‌مسیرها در سناریوها در ادامه آمده است، و از تک‌مسیرهای مشابه (مانند S3-F5 که معادل تک مسیر S7-F9) خودداری شده است. قبل از هر توضیحی لازم است تا چگونگی استخراج شکل‌های ۸ از شکل۷ شرح داده شود. در ابتدای مسیر که چراغ سیگنال قرار دارد به عنوان یک مکان به نام S1 تعریف شد. این چراغ سیگنال با دستور sign1=withe برای مجوز خروج از ایستگاه که با مکان صورتی رنگ جهت فعال‌سازی نمایش داده شده است، حضور قطار در هر جایگاهی با مکان (که برای این مسیر مکان اولیه با Train12=t12) معرفی شده است، ارتباط گذارها و مکان‌ها با trx (در این مسیر tr1=train به این معناست که قطار باید در مکان Train12 وجود داشته باشد) در این کار از tr1,tr2,tr3 استفاده شد چون نهایت تعداد قطارهایی که ممکن است قصد ورود به یک مکان را داشته باشد بیشتر از سه ناحیه (مناطق سوزن) نمی‌تواند باشد، بیان گردید. جهت تایید نهایی از مکان‌هایی به نام set و برای مجوز نهایی عبور از مکانهایی به نام pass استفاده شده است، در صورت برقراری شرایط بیان شده گذار T7211 فعال می‌گردد تا قطار از مکان Ttrin12 به مکان Train11 هدایت شود. مابقی مسیر نیز به همین صورت اجرا شده است تا قطار مسیر مطلوب (که شامل چهار تراک است) را طی کند. این بیانات در قالب دستور ۱ تعریف شده است.

دستور (۱)

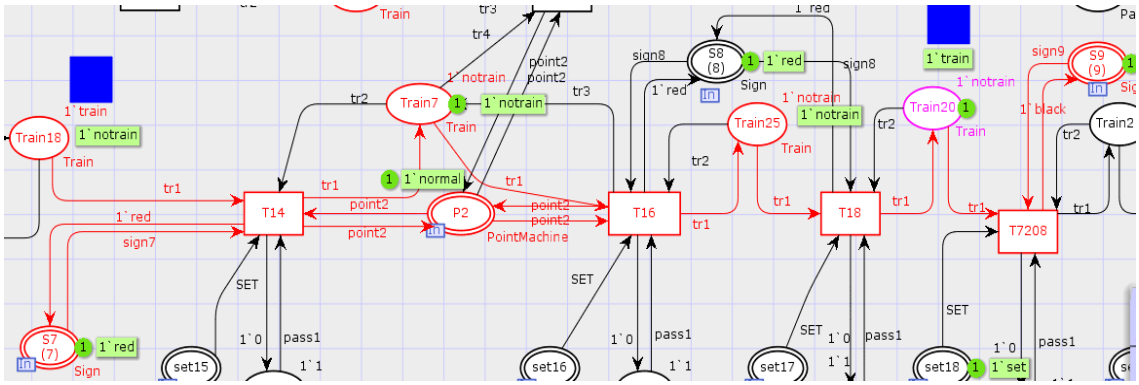
(tr1=train and also sign1=with
and also tr2=not rain) and also pass1=1)

Archive of SID.ir

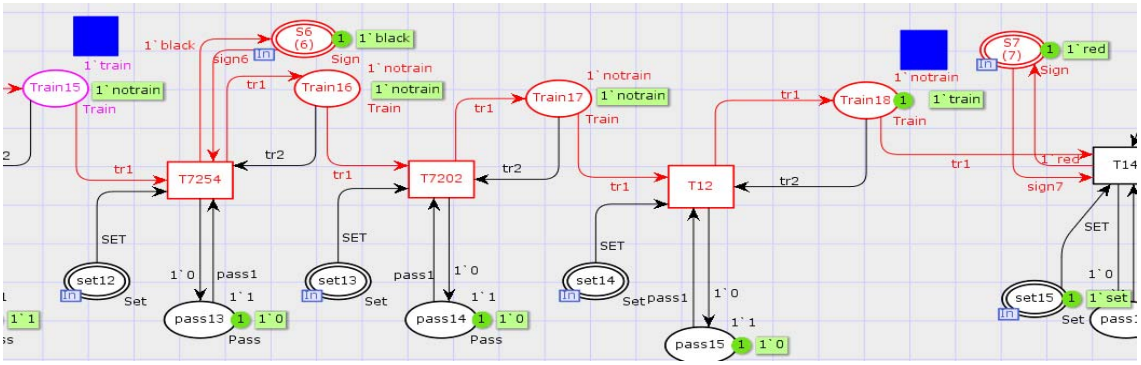
Archive of SID.ir



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۸ نمایش رفتار پویای سه تک مسیرالف) S1-F2 ، ب) S7-F9 و ج) S6-F7، پس از اجرا

طبق تعریف شماره ۱ شرط فعال شدن T7211، با وجود قطار در مکان۱۲ امکان‌پذیر شده است. تعریف شماره ۲ نیز با دستورات ۲ و ۳ که مرتبط با گذارها هستند، حالت‌های ممکن برای مسیر را ایجاد می‌کنند.

دستور (۲)

[((tr1=train) and also (tr2=not rain)) and also pass1=1]

دستور (۳)

[((tr1=train) and also (tr2=not rain)) and also pass1=1]

و اما در ارتباط با تعریف شماره ۳ باید گفت:

$$A(a_{ji}) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$X = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad , \quad u = [1 \quad 0 \quad 0]$$
$$X'_1 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$
$$X'_2 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$
$$X'_3 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

همانطور که در شکل ۸ (الف) قابل رویت است تحت شرایطی که مکان Train12=train باشد قطار از S1 به حرکت درآمده و متناسب با مسیر مطلوب، تا قبل از چراغ سیگنال S2=F2 (واقع در مکان Train9) متوقف گردیده است. این فرآیند بیانگر اینست که قطار بدون گرفتن مجوز از اپراتور هرگز وارد میسر بعد (S2-F3) نشده است و چنانچه قطاری در مسیر(S2-F3) نیز وجود داشته باشد تا زمانی که این مسیر آزاد نشده است، مجوز به قطار موجود در مسیر قبل، به این مسیر داده نخواهد شد. شکل۸ (ب) تک مسیرS7-F9 را اجرا کرده است، این تک‌مسیر در منطقه سوزن قرار دارد. سوزن باید در حالت نرمال(عادی- مستقیم) قرار گیرد تا این تک‌مسیر طی شود، همانطور در شکل دیده می‌شود پس از اجرای برنامه، آخرین وضعیتی که سوزن در آن قرار داشته، در کنار آن (در کادر سبز رنگ با نوشته normal) نشان داده شده است. این بدین معناست که سوزن با توجه به مسیر داده شده در وضعیت عملکرد صحیح قرار داشته است. شکل۸ (ج) نیز رفتاری پویا از تک‌مسیر S6-F7 را به نمایش گذاشته است. در این تک مسیر نیز پس از اجرا رفتار آن به گونه ایست که قطار در مکان Train18 و پشت چراغ سیگنالS7 (پایان تک مسیر) متوقف شده است.

نمایش نمودار دسترس‌پذیری

علاوه بر نمایش رفتار پویای شبکه، از دیگر قابلیت این نرم‌افزار می‌توان به نمایش نمودار و یا درخت دسترس‌پذیری رفتار شبکه، جهت تأیید رفتار پویای مدل شبیه‌سازی شده اشاره نمود. در این روش حالاتی را که مدل در آن قرار می‌گیرد و پشت سر می‌گذارد، قابل مشاهده است. دسترسی به حالات فعال مسیر S1-F2 از طریق نمایش نمودار دسترس‌پذیری امکان‌پذیر است. انتظار می‌رود تنها گذارهایی که در این مسیر قرار دارند (T7211, T7209, T7207)، فعال شوند و گذار بعد از آن (مانندT17) که مربوط به مسیر دوم است فعال نگردد. شکل۹ نمودار مربوط به مسیر ذکر شده را نمایش می‌دهد، که در مقایسه با حرکت قطار از ابتدا تا انتهای مسیر نشان داده شده در شکل۹ در ارتباط با گذارهای فعال تفاوتی حاصل نشده است.

در شکل۹ درون پنجمین نود عبارت 1:0 ثبت شده است. این عبارت بدین معناست که از این مرحله به بعد هیچ‌گذار دیگری فعال نشده است و قطار منتظر می‌ماند تا مجوز مسیر دوم را دریافت کند.

به دلیل اینکه مدل کنترل شبکه براساس تفکیک مسیر طراحی شده است، حرکت قطار در طول تک مسیر مذکور سلسله‌وار (بدون وقفه) نخواهد بود. می‌توان گفت نمایش نمودار دسترس‌پذیری کل شبکه بطور پیوسته غیرممکن است.

در راستای این بخش نیز سناریویی تحت عنوان نقض فنی و یا توقف قطار در تک مسیر S3-F5 مورد بررسی قرار داده شد تا دلیلی را اثبات کند، و آن اینست که، چنانچه قطاری در این تک مسیر فوق دچار مشکل شده باشد را چگونه می‌توان از خط خارج نمود؟ در این تک مسیر برای مثال قطاری در مکان Train5 (شکل۱۰) دچار مشکل و متوقف شده باشد، خروج قطار از مسیر اصلی با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر خروج از خط (که با ورود لکوموتیو و یا قطارخط مقابل از خط دیگری جهت متصل‌شدن به قطار دچار نقص) و همچنین وارد شدن تک مسیر S4-F9، که توسط اپراتور به قطار داده می‌شود، خارج می‌گردد. شایان ذکر است چنانچه مسیر خروج قطار معیوب در خط خود کوتاه‌تر و به دور از مناطق سوزن باشد ترجیحا از خط مستقر خارج می‌شود. علاوه براین در شبکه ریلی نیز دستوری برای همین امر ایجاد کردیم تا در صورتی که این اتفاق رخ داد با توجه به دستور ٤ از خط خارج و وارد مکان مشترک Train19 شود و از آنجا اقدام به خروج خط از طریق سوزن نماید. شکل۱۰ همانگونه که انتظار می‌رفت قطار پس از اجرای برنامه، مسیر اصلی را ترک و در مکانTrain20 و پشت چراغ S9 قرار گرفته است.

دستور (٤)

[(tr1=train and also tr2=not rain) or else (sign4=green and also tr2=train and also point1=reverse) and also pass1=1]

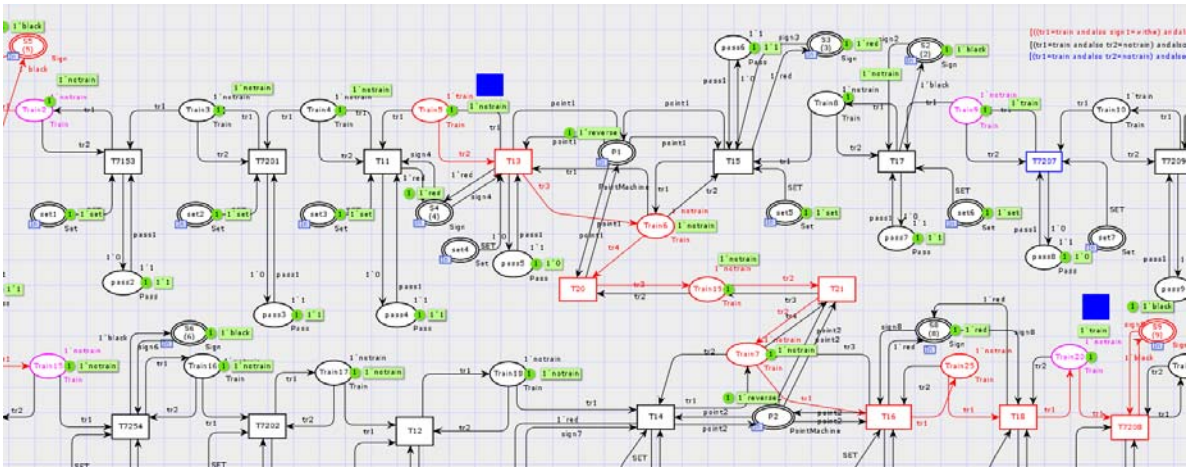
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شکل۹. نمودار دسترس‌پذیری مسیر S1-F2

الزامات ایمنی

از آنجایی که شبکه‌های ریلی روز به روز در حال گسترش هستند، توجه به مسئله ایمنی امری مهم بشمار می‌آید. در این راستا استاندارد اروپایی حفاظت و کنترل سیستم‌های سیگنالینگ راه‌آهن EN-50128، به برآورده کردن سطح ایمنی۳ و ٤، جهت تضمین ایمنی سیستم‌ها را الزامی دانسته و توصیه به استفاده از روش‌های رسمی را تاکید می‌کند (EN,B 2014)، در مدل شبیه‌سازی شده نیز الزاماتی درنظر گرفته شد تا از برخورد قطارها جلوگیری به عمل آید، که به شرح ادامه است.



شکل۱۰. اجرای مسیر S4-F9

الزام ۱: در هر مکان فقط و فقط توسط یک قطار اشغال شده باشد و یا هیچ قطاری حضور نداشته باشد، تا ایمنی برخورد تضمین گردد. برای برآورده ساختن این الزام، سناریویی را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا از عدم برخورد قطارها اطمینان حاصل شود. در شکل۱۱ (الف) در مکان‌های Train10 و Train12 که با کادر آبی رنگ مشخص شده است، قطار وجود دارد. می‌خواهیم تصمیم مدل در برابر رخ دادن خطای انسانی را مورد بررسی قرار دهیم. با فرض اینکه اپراتور متوجه اشغال بودن مسیر توسط قطار مکان Train10 نشده و مجوز را به قطاری که در مکان Train12 قرار دارد، صادر کند. حال با نمایش رفتار پویای سیستم و نتایج آن، الزام عدم برخورد قابل اثبات است. پس از اجرای این مسیر (شکل۱۱ (ب)) قطار از مکان Train12 وارد مکان Train11 شده (که با کادر سبز رنگ بالای مکان نشان داده شده است) و با متوجه شدن حضور قطار در مکان بعد (Train10) متوقف می‌شود و از طرفی قطاری که در مکان Train10 حضور داشته به مسیر

Archive of SID.ir

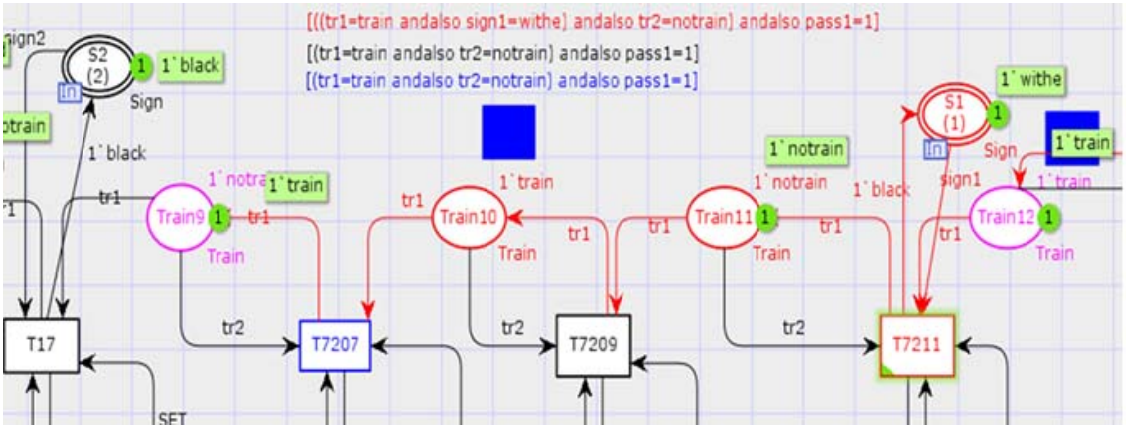
Archive of SID.ir

خود ادامه می‌دهد و پشت چراغ سیگنال S2=F2 متوقف می‌شود. این تصمیم نشان داد که در صورت وجود خطای انسانی نیز برخوردی صورت نگرفته است و هیچ دو قطاری در یک مکان قرار نگرفته است. از دستور ۵ برای تضمین آزاد بودن مسیر استفاده شده است.

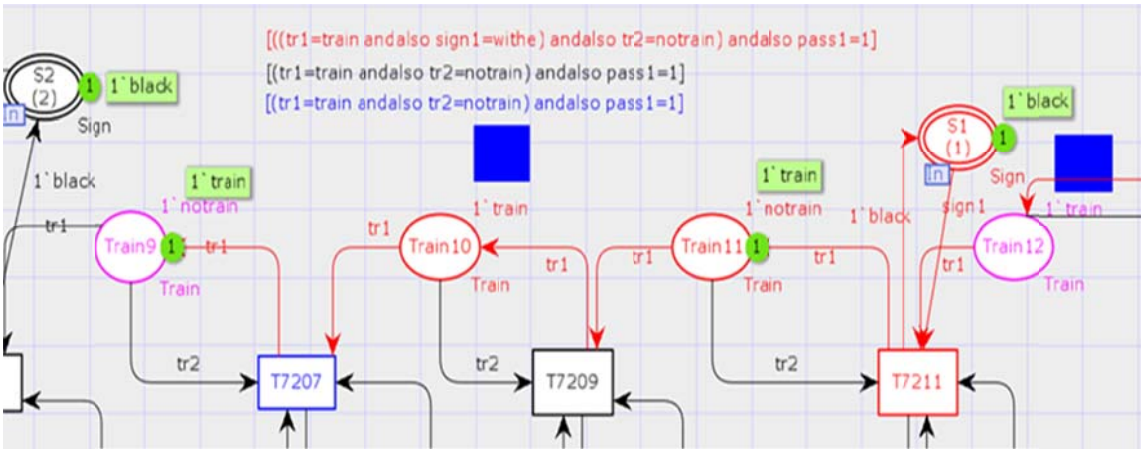
دستور (۵)

[((tr1=train) and also (tr2=not rain))
And also pass1=1]

روشی دیگر جهت اطمینان از عدم برخورد قطارها با یکدیگر همانطور که در بخش۸ به آن اشاره شد تحلیل نمودار دسترس‌پذیری است. برای شکل۱۱(الف) انتظار می‌رود گذار T7209 غیرفعال باشد، تا برخوردی پیش نیاید. قطار به مسیر خود ادامه می‌دهد (شکل (ب)) تا اینکه در مکان Train11 متوقف شده، و وارد مکان بعد (Train10) نشده است. شکل ۱۲ نمودار دسترس‌پذیری این مسیر را نشان داده است، که تنها گذارهای T7211 و T7207 فعال شده‌اند و هیچ اثری از فعال شدن T7209 وجود ندارد. این بدین معناست که اطمینان از عدم برخورد قطارها با یکدیگر برآورده شده است، همچنین با توجه به دستور۵ که بیان می‌دارد "گذار در صورتی که در تراک روبه جلو قطاری وجود ندارد فعال شود" به همین دلیل می‌توان اطمینان حاصل نمود که تحت هیچ شرایطی قرار گرفتن دو قطار در یک مکان امکان‌پذیر نیست. علاوه بر نمایش رفتار پویای مدل، در گزارشی که در شکل۱۳ از مدل بدست آمده می‌توان مجددا به اثبات این الزام پی‌برد. در این شکل چنانچه برخوردی صورت گرفته باشد باید در بخش Upper عددی بیشتر از ۱ ثبت شود، همانطور که ملاحظه می‌گردد چنین اتفاقی رخ نداده است، و حداکثر مقدار در مکان‌ها بیشتر از ۱ ثبت نشده است.



(الف)

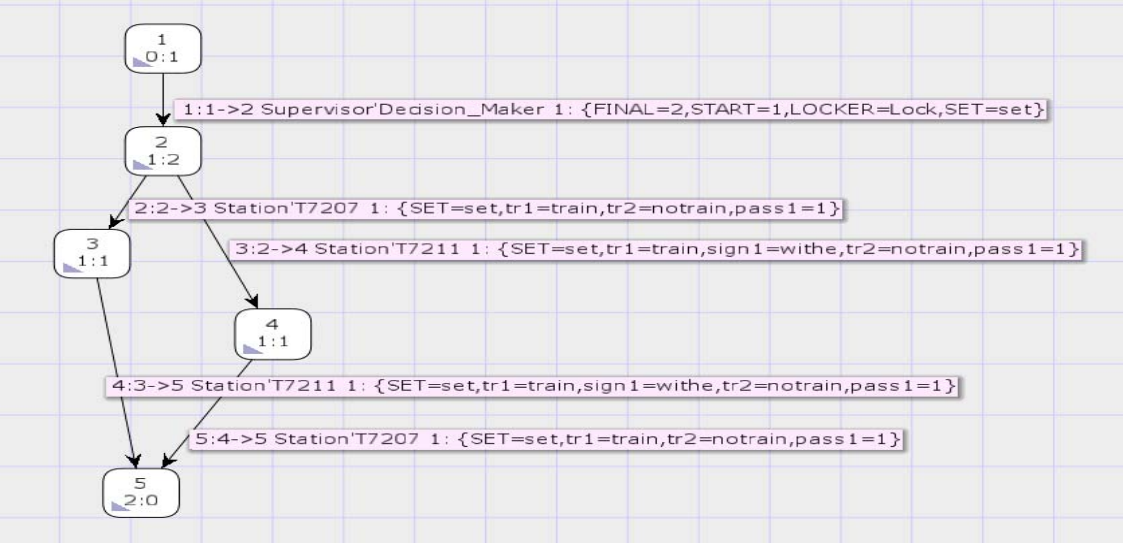


(ب)

شکل۱۱. مدل الزام عدم برخورد، الف)لحظه فعال شدن گذار T7211، ب)بعد از اجرای مسیر

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل۱۲. نمودار دسترس‌پذیری

```
CPN Tools state space report for:
Report generated: Wed May 12 15:30:24 2021
--------------------------------------------------------------------------

 Best Integer Bounds
                        Upper   Lower                       Upper   Lower

    Station'Train10 1     1       0       Station'Train21 1     1       1
    Station'Train1  1     1       1       Station'Train22 1     1       1
    Station'Train11 1     1       1       Station'Train23 1     1       1
    Station'Train12 1     1       0       Station'Train24 1     1       1
    Station'Train14 1     1       1       Station'Train25 1     1       1
    Station'Train15 1     1       1       Station'Train3  1     1       1
    Station'Train16 1     1       1       Station'Train4  1     1       1
    Station'Train17 1     1       1       Station'Train5  1     1       1
    Station'Train18 1     1       1       Station'Train6  1     1       1
    Station'Train19 1     1       1       Station'Train7  1     1       1
    Station'Train20 1     1       1       Station'Train8  1     1       1
    Station'Train2  1     1       1       Station'Train9  1     1       1
```

شکل۱۳. گزارش مسیر

الزام۲: هنگامی که یک مسیر فعال می‌شود، چراغ سیگنال باید فقط یک رنگ در همان لحظه را نشان دهد تا راهبر با دیدن آن تصمیم به ادامه مسیر و یا توقف در آن مکان را بگیرد.

از دستور ٦ برای چراغ سیگنال استفاده شد تا فقط در صورتی چراغ سیگنال روشن (نور سفید(withe)) گردد که نقطه شروع از این سیگنال باشد. همچنین با فعال شدن T7211، چراغ سیگنال با دریافت اطلاعات از این گذار (که به منزله‌ی عبور قطار از مکان۱۲ است) وضعیت خود را به black بلافاصله تغییر داده است، که این تغیر در حین اجرای مدل قابل رویت است. در شکل۱۱ (ب) قطار بعد از آزاد کردن مکان Train12 علاوه بر تغییر وضعیت دادن چراغ سیگنال، نشان می‌دهد مسیر برای قطار بعد تا صدور مجوز قفل شده است.

دستور (٦)

If START=1 then 1'with' else 1'black'

الزام ۳: هنگامی که مجوز یک مسیر صادر می‌شود، از وضعیت نرمال و یا عادی بودن سوزن اطمینان حاصل گردد. مطابق با جداول ۱ و ۲ برای تمامی مسیرها اطلاع از وضعیت سوزن‌ها الزامی نیست، و فقط برای مسیرهایی که با سوزن تداخل دارند، با لحاظ کردن دستور ۷ برای سوزن‌های P1 و P2 مطابق با شکل ١٤ این الزام برآورده شده است.

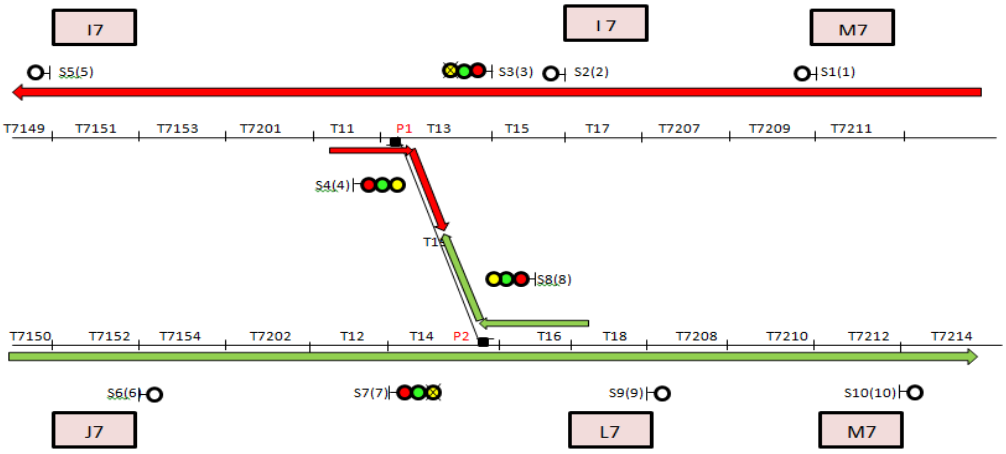
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

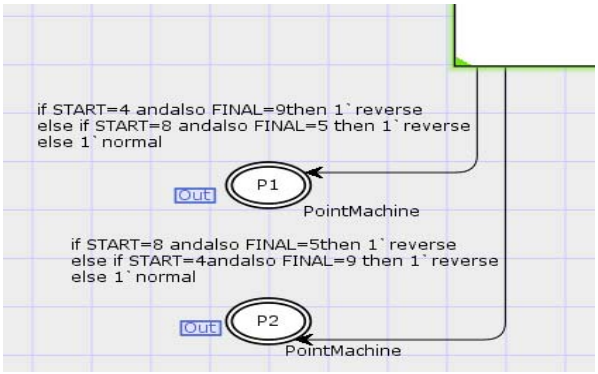
دستور (۷)

```
if START=4 andalso FINAL=9 then 1'reverse
else if STATR=8 andalso FINAL=5 then
1'reverse else 1' normal
```

این دستور بیان می‌دارد که تنها برای مسیرهای با نقطه شروع ٤ و نقطه پایان ۹ و بالعکس به طور معکوس عمل نماید (در شکل ۱۰ نیز رفتار پویای این دستور بر روی شبکه ریلی نشان داده شده است) و در غیر اینصورت برای سایر مسیرها در حالت نرمال باشد. در شکل ۱۵ دستورات کنترلی مرتبط با مسیرهایی که با سوزن برخورد دارند را در فضای نرم‌افزار، نشان داده شده است. همچنین برای برآورده ساختن این الزام شکل‌های ۸ (ب) و ۱۰، پس از اجرای برنامه، آخرین وضعیت سوزن‌ها را نشان داده است، که این وضعیت سوزن بهنگام عبور قطار بوده است. شکل ۸ (ب) در وضعیت نرمال سوزن برای مسیر مستقیم قرار داشت و شکل ۱۰ هر دو سوزن در وضعیت معکوس قرار دارند تا قطار از خط بالا به خط پایین انتقال یابد. بنابراین نتایج نشان داده شده حاکی از آنست که، سوزن در تشخیص مسیرهای مختلف عملکردی صحیح داشته است.



شکل ١٤. نمایش مسیرها در طرح مسیر



شکل۱۵. دستورات کنترلی سوزن‌های مسیر در فضای نرم‌افزار

بررسی نتایج مدل

برای اثبات درستی طراحی مدل سعی بر این شد تا با تکنیک بررسی مدل بتوان مدل CPN طرح مسیر و همچنین چگونگی بهره‌برداری از خط را به چالش کشاند. در بخش ۸ مسیر S1-F2 برای این آزمون مورد بررسی قرار گرفت که رفتار پویای شبکه در شکل‌های ۸ این ادعا را ثابت کرده است و در ادامه از نمودار دسترس‌پذیری نیز جهت حصول اطمینان بیشتر این آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه این دو روش نتایج اینگونه بدست آمد که هیچ مغایرتی در نشان دادن حرکت قطارها در هر دو روش وجود ندارد. در بخش ۹ نیز الزاماتی درنظر گرفته شد تا بهره‌برداری از خط با تضمین ایمنی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

همراه باشد و مورد تأیید نهایی واقع گردد. از این رو سناریویی تعریف شد تا در اثبات برآورده شدن این الزامات نقش بسزایی داشته باشد. نتایج سناریو بیانگر اثبات تضمین عدم برخورد بود، و حاکی از آنست که هیچ برخورد و اتفاقی رخ نداده است، همچنین عملکرد به موقع و صحیح، سوزن و چراغ سیگنال نشان داده شد. با این اوصاف نتایج به این ترتیب بدست آمد که مزایای استفاده از تکنیک‌های بررسی مدل برای تایید و اثبات الزامات ایمنی مؤثر واقع شد.

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی یک مدل CPN برای شبکه ریلی مسیرسازی به منظور افزایش ظرفیت خط به همراه تضمین ایمنی ارائه شد. هدف اصلی این مقاله، زبان اختصاصی CPN است. یک زبان رسمی که هر دو رابط گرافیکی و بصری را به مهندسین سیگنالینگ ارائه می‌دهد و از تأیید، تغییر مدل و شبیه‌سازی ظرفیت خطوط پشتیبانی می‌کند. بکارگیری شبکه‌های سلسله مراتبی، اساس اصلی در طراحی این مدل بود، که به کمک آن ظرفیت خط با تفکیک مسیرهای متوالی و هدایت قطار در مسیرها، جهت حداکثر بهره‌برداری خط صورت گرفت. این فرآیند با انتخاب مسیر توسط اپراتور با رعایت ترتیب مسیرها طبق جداول ۱ و ۲ ، در زمان مناسب و به طور متوالی در هر خط امکان‌پذیر است. همچنین با مشاهده عبور قطار از چراغ سیگنال، این قابلیت به اپراتور داده می‌شود تا مجوز صدور برای قطار بعدی جهت ورود به همان تک‌مسیر را با تضمین ایمنی داده شود. از اینرو هیچ یک از تراک‌ها نمی‌تواند بدون قطار باشد و این بدین معناست که قادر خواهیم بود حداکثر استفاده از ظرفیت سرویس‌دهی خط را داشته باشیم. طراحی با تکنیک بررسی مدل و همچنین نتایج از گزارش استخراج شده توسط نرم‌افزار مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت نتیجه می‌شود، که استفاده از شبکه‌های پتری در زمینه حمل و نقل ریلی به دلیل قابلیت نمایش رفتار دینامیک مدل توانسته جایگاه ویژه‌ای نسبت به سایر روش‌های رسمی را به خود اختصاص دهد.

۶-پی‌نوشت‌ها

1. High Level Petri Nets
2. Dwell Signal

۷-مراجع

-Bjork, J., & Andres, M. H. (2005). Challenges in simulating railway systems using Petri Nets. Precise Modeling and Analysis, Department of Informatics, *Univesity of Oslo.*

-Boudi, Z., Wakrime, A. A., Dutilleul, S. C., &Haloua, M. (2019). Introducing B-Sequenced Petri Nets as a CPN Sub-class for Safe Train Control. *Paper presented at the ENASE*.

- Burkolter, D. M. (2005). Capacity of railways in station areas using Petri nets. *ETH Zurich*.

-Cazenave, P., Khlif-Bouassida, M., & Toguyéni, A. (2022). Deadlock and collision avoidance in railway networks with dynamic routing: A petri net approach with partial controllability and observability. *15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis.*

-El Amraoui, A., & Mesghouni, K. (2014). Colored petri net model for discrete system communication management on the european rail traffic management system (ertms) level 2. *Paper presented at the 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*.

-EN, B. (2014). 50128: 2011: Bs en 50128: 2011: Railway applications-communication, signalling and processing systems-software for railway control and protecting systems. Standard, *Britisch Standards Institute (BSI)*, 82.

- Enache, M. F., Al-Janabi, D., & Letia, T. S. (2018). Railway modeling with object enhanced time Petri nets. *Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR).*

-Iliasov, A., Lopatkin, I., & Romanovsky, A. (2014). Practical formal methods in railways the safecap approach. *Paper presented at the Ada-Europe International Conference on Reliable Software Technologies*.

-Jabri, S., Bourdeaud'huy, T., & Lemaire, E. (2010). European railway traffic management system validation using UML/Petri nets modelling strategy. *European Transport Research Review,*Vol. 2, No. 2, 113-128.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

-Sedykh, I., & Demakhin, D. (2020). Petri transport networks. *Journal of Series Physics, Conference*.

- Üs ğlu, İ., Töpel, D., Durmus, M. S., Tsarev, R. Y., & Zhigalov, K. Y. (2019). Obtaining Generic Petri Net Models of Railway Signaling Equipment. *Proceedings of the to Computational Methods in Systems and Software.*

-Toguyeni, A. (2021). Synthesis of Petri nets based controllers for the automation of train routing in a railway node. *20th International Conference on Modelling and Applied Simulation*, MAS.

-Vanit-Anunchai, S. (2010). Modelling railway interlocking tables using coloured petri nets. *International Conference on Coordination Languages and Models*.

-Wang, P., Ma, L., Goverde, R. M., & Wang, Q. (2015). Rescheduling trains using Petri nets and heuristic search. *IEEE Transactions on intelligent Transportation Systems,* Vol.17, No. 3, 726-735 .

-Wang, L ,.Tong, Y., & Wang, X. (2020). Modeling and Verification of Train Operation in Stations and Block Sections Using Petri Nets. *International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI).*

-Yildirim, U., Durmuş, M. S., & Söylemez, M. T. (2010). Fail-safe signalization and interlocking design for a railway yard: an automation petri net approach. *7th International Symposium on Intelligent and Manufacturing Systems (IMS).*

-Jingjia, H., & Tao, H. (2020). Modeling and Verification of CTCS-3 On-board Equipment Based on Colored Petri Net. *Paper presented at the Journal of Physics*. Conference Series.

-Le, B., Andrews, J., & Fecarotti, C. (2017). A Petri net model for railway bridge maintenance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O. *Journal of Risk and Reliability,*Vol. 231, No. 3, 306-323.

- Liang, H., Zhao, H., Wang, S., & Zhang, Y. (2020). LTE-U based Train to Train Communication System in CBTC: System Desin and Reliability Analysis. *Wireless Communications and Mobile Computing.*

- Li, Y., Tong, Y., & Guo, J. (2019). Design of the Safety Control Logic for Railway Stations Based on Petri Nets. Paper presented at the 2019 CAA Symposium on Fault Detection, *Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS).*

-Lin, J., & Xu, Q. (2020). Functional safety verification of train control procedure in train-centric CBTC by colored Petri net. *Archives of Transport,*Vol. 54, No. 2, 43-58.

- Luo, J., Zhou, M., & Wang, J.-Q. (2021). A Place-Timed Petri Net-Based Method to Avoid Deadlock and Conflict in Railway Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.*

-Milinković, S., Mašek, J., Vesković, S., Marković, M., & Belošević, I. (2016). Simulating Train Traffic On A Double Track Railway Line By Petri Nets. *Horizons*.

-Rama, D., & Andrews, J. D. (2015). A holistic approach to railway infrastructure asset management. *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 11, No. 2.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Design and Modeling of Rail Network (Tehran Metro Line7) By Creating a Routing to Increase Line Service and Ensure Safety by the Method Petri Nets

Mohammad Ali Sandidzadeh, Associate Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology (IUST), Tehran, Iran.

Hajar Ghasemi, M.Sc., Grad., School of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

Received: September 2023 Accepted: January 2024

ABSTRACT

This paper deals with modeling the rail network with the route separation technique in order to build the route and increase line service with safety assurance, which is an important issue in the rail transport industry. Using formal methods, the paper presents a model for increasing line capacity using the High Level Petri Nets (HLPN) method. The model is designed with CPNTools software. The reason for using this software is to support hierarchical networks, which are the basic principles of this work. Using this software, with the implementation of various scenarios, it is possible to evaluate and approve with the high-speed. This paper mainly focuses on designing to increase the capacity of lines by "one-way creation" with the help of hierarchical networks in the field of urban rail transport. Three stations of Tehran Metro Line 7 as a selected route plan by creating a "route construction" and the technique of "separating consecutive line routes" (single route) from the desired single route signal to the next single route signal on a regular basis. , Increasing the capacity and operation of the line is possible with a guarantee of safety. By showing the dynamic behavior of the model, it is proved by the mentioned software that the path construction to increase the service has been done correctly. Experimental results show that the simulated model, in the neutralization of time models has ensured the assistance and increase of line service while observing safety.

Keywords: Safety Assurance, Petri Nets and Hierarchies, Increased Line Service, HLPN

Archive of SID.ir