

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M

با استفاده از شبکه‌های پتری

الهه نوری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمدعلی صندیدزاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

Email: sandidzadeh@iust.ac.ir

۱۳۹۸/۰۴/۱۱

دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

چکیده

شبکه راه آهن به عنوان یک وسیله حمل و نقل عمومی و جابجایی بار، به عملکردی با افزایش سطح قابلیت اطمینان، دسترس پذیری، تعمیر پذیری و ایمنی نیاز دارد. برای عملکرد ایمن شبکه راه آهن، تشخیص حضور قطار در هر تراز بسیار مهم است. یکی از متداول ترین راهکارها در تشخیص حضور قطار استفاده از مدار راه است. برای جلوگیری از خرابی مدار راه و خطرات ناشی از آن و به حداقل رساندن تأخیر قطارها استفاده از یک سیستم پایش وضعیت ضروری است. یکی از روش‌های جدید پایش وضعیت، عیب‌یابی به وسیله شبکه‌های پتری است. در این مقاله از یک شبکه پتری جهت تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه فرکانس صوتی TI21-M استفاده شده است. مدار راه TI21-M در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده و از داده‌های حاصل از آن به عنوان ورودی شبکه پتری استفاده شده است. از آنجا که مدار راه، یک سیستم دینامیک پیوسته است، رفتار آن به صورت گسسته در نظر گرفته شده و مدل پتری تغییرات ولتاژ و جریان اجزای مختلف مدار راه، تغییرات مقاومت کابل‌ها و تغییرات امپدانس ریل در محیط استیت‌فلو متلب شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به تغییر حالت‌های مدل پتری شبیه‌سازی شده، نه تنها مدار راه معیوب، بلکه مکان رخ دادن عیوب مختلف نیز مشخص می‌شود. قابل ذکر است که این شبکه قابلیت تشخیص عیوب به‌طور هم‌زمان را نیز دارا است.

واژه‌های کلیدی: شبکه راه آهن، سیستم سیگنالینگ، مدار راه TI21-M، پایش وضعیت، شبکه‌های پتری

۱. مقدمه

یک سیستم حمل و نقل ریلی از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین بخش‌های آن، سیستم سیگنالینگ است. بخش سیگنالینگ نیز دارای قسمت‌های مختلفی از جمله سیستم تشخیص قطار است. یکی از متداول‌ترین روش‌های تشخیص قطار استفاده از مدار راه است. امروزه در بیشتر خطوط ریلی از مدار راه‌های فرکانس صوتی استفاده می‌شود که در این مقاله نیز یک مدار راه فرکانس صوتی TI21-M مورد بررسی و عیب‌یابی قرار گرفته است. مدار راه به صورت خراب-ایمن طراحی شده است، به این معنی که در هنگام خرابی اشغال گزارش می‌شود و قطار اجازه‌ی وارد شدن به تراک مربوطه را ندارد. این امر از برخورد و تصادفات جلوگیری می‌کند، اما منجر به تاخیر در حرکت قطارها می‌شود. علاوه بر این، علی‌رغم طراحی خراب-ایمن مدار راه، شرایطی وجود دارد که در آن یک تراک به‌طور نادرست آزاد گزارش می‌شود، که می‌تواند منجر به شرایط خطرناک شود. بنابراین به‌کارگیری یک سیستم پایش وضعیت برای تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه، به منظور ایمنی و قابلیت اطمینان این سیستم، امر مهمی است.

هدف از پایش وضعیت و همچنین تشخیص و ایزولاسیون عیوب یک مدار راه شامل موارد زیر می‌شود:

- بهبود قابلیت اطمینان و قابلیت دسترس‌پذیری با کاهش خرابی در طول ساعات کار و کاهش تاخیرات قطار.
- بهبود قابلیت تشخیص عیوب همراه با طبقه‌بندی عیوب و مشخص کردن محل رخداد عیوب.
- کاهش بازرسی‌های دوره‌ای تعمیر و نگهداری توسط نیروی انسانی.

- کاهش خطاهای انسانی در تشخیص و شناسایی عیوب.
- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و جایگزینی.
- بهبود کلی در عملکرد مدار راه و افزایش کیفیت خدمات راه‌آهن.

در تحقیقات اخیر روی تشخیص و آشکارسازی عیوب مدار راه، کارهای زیادی انجام شده است. چندین روش برای تشخیص و آشکارسازی عیوب مدار راه در [Welankiwar Bruin et al.], [Aravindh et al. 2017], [et al. 2018], [Sandidzadeh and Deghani, 2013] و [Chen et al. 2008] ارائه شده است. در اکثر این تحقیقات از روش‌های مبتنی بر مدل مانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی استفاده شده است. در [Welankiwar et al. 2018] با استفاده از دوربین‌هایی که در مسیر نصب شده، عکس‌هایی از خطوط گرفته می‌شود. این عکس‌ها پردازش شده و با استفاده از شبکه‌های عصبی عیوب مربوط به عیوب ریل بررسی می‌شود. در این روش اگرچه دقت تشخیص عیوب بسیار بالا است اما به علت استفاده از دوربین‌های با دقت بالا، بسیار هزینه‌بر بوده و همچنین عیوب محدودی را مورد بررسی قرار می‌دهد. مقاله‌های [Aravindh et al. 2017] و [Bruin et al. 2016] از شبکه‌های عصبی بازگشتی برای تشخیص عیوب استفاده نموده‌اند. آنچه این مقاله را از دیگر مقالات متمایز نموده، استفاده از تنها یک سیگنال به عنوان داده‌ی اندازه‌گیری شده است، که باعث کاهش هزینه‌های مربوط به سیستم مانیتورینگ می‌شود، اما ضعف آن در تشخیص تعداد محدودی از عیوب است. شبکه‌های عصبی با وجود آن‌که دارای مزایای دقت نگاشت ورودی-خروجی و قدرت تطبیق‌پذیری هستند، اما به دلیل عدم قدرت تفسیر و تجزیه و تحلیل عیوب سیستم و صرف زمان قابل ملاحظه برای کشف ساختار داخلی و همچنین طولانی بودن زمان آموزش شبکه، محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کنند، علاوه بر این به منابع محاسباتی بیشتر و حجم

ریل، قابل استفاده است. در [Cao and Sun, 2018] از حداقل مربعات بردار پشتیبانی برای عیب‌یابی مدار راه استفاده شده است. این روش اگرچه دقت بالایی در شناسایی عیوب داشته است اما تنها عیوب کلی مورد بررسی قرار گرفته و اجزای مدار راه به صورت جزئی مورد بررسی قرار نگرفته است؛ از جمله خطا در تراک اصلی، خطا در محدوده واحد تنظیم و خطا در کانال فرستنده و خطای درونی. در [Pengrui and Wenchang, 2019] ماشین بردار پشتیبانی به عنوان روشی برای تشخیص عیوب مدار راه مطرح شده است. در این مقاله تحقیقاتی در مورد عیب‌یابی تجهیزات مدار راه با استفاده از این روش انجام شده اما این تحقیقات به صورت عملی تست نشده و عیوب مدار راه نیز مشخص نشده است. در شناسایی عیوب خازن جبران‌ساز در مدار راه نیز تحقیقات گسترده‌ای شده است. در [Lin-Hai et al. 2012] از یک روش ترکیبی مبتنی بر کرنل بهینه تطبیقی در حوزه‌ی زمان-فرکانس، در [Côme et al. 2012] روشی با استفاده از آنالیز فاکتور مستقل نیمه‌نظارتی و دانش قبلی و در [Oukhellou et al. 2010] روش دیگری با استفاده از کلاس‌بندی دمپستر شیفر مبتنی بر بردار مشخصه، برای عیب‌یابی خازن جبران‌ساز ارائه شده است. توجه شود که در این روش‌ها تنها عیوب مربوط به خازن جبران‌ساز بررسی می‌شود.

در این مقاله از شبکه‌های پتری برای تشخیص و ایزولاسیون عیوب استفاده می‌شود. شبکه پتریک ابزار گرافیکی قدرتمند است که به دلیل امکان تجزیه و تحلیل و پیاده‌سازی به صورت هم‌زمان و هم‌چنین مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌هایی با ماهیت هم‌زمان و موازی، در بسیاری از زمینه‌ها روش مناسب‌تری است. از جمله تحقیقات انجام شده در این حوزه می‌توان به مدل شناسایی رفتار غیرقابل مشاهده در سیستم‌های رویداد گسسته با استفاده از شبکه‌های پتری [Zhu, Wang and Wang, 2019] عیب‌یابی سیستم‌های رویداد

زیادی از داده‌های ورودی و خروجی سیستم به منظور آموزش شبکه نیاز دارند. هم‌چنین شبکه‌های عصبی "جعبه سیاه" هستند و توانایی محدودی برای شناسایی روابط علت و معلولی دارند. در [Sandidzadeh and Dehghani, 2013] از یک شبکه‌ی فازی-عصبی برای تشخیص عیوب استفاده شده است. آنچه در این مقاله مورد توجه قرار نگرفته است، وضعیت آزاد یا اشغال بودن تراک در عیب‌یابی است و مدار راه تنها در حالتی که تراک آزاد است مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه‌های فازی-عصبی اگرچه دارای دقت نسبتاً خوبی بوده و در صورت وجود اطلاعات نادقیق و نامشخص از سیستم، با ترکیب منطق فازی و شبکه‌های عصبی به مدل‌سازی سیستم می‌پردازد، اما به مجموعه قابل ملاحظه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی سیستم و هم‌چنین مجموعه‌ای از قوانین اگر و آنگاه نیاز دارد که جمع‌آوری این مجموعه از داده‌ها و قوانین محدودیت‌هایی را در این روش ایجاد می‌کند. هم‌چنین شبکه‌های فازی-عصبی به نوعی "جعبه سیاه" هستند و توانایی محدودی در شناسایی روابط علت و معلولی دارند، به همین علت ساختار داخلی این شبکه‌ها برای اپراتور ملموس و شفاف نبوده و امکان تجزیه و تحلیل علل عیوب و هم‌چنین اثرات عیوب بر سیستم وجود ندارد. مقالات [Spunei et al. 2018] و [Anitha, 2017] با استفاده از اتوماسیون و ابزار اتوماتیک به عیب‌یابی مدار راه پرداخته‌اند. در روش [Spunei et al. 2018] با استفاده از نرم‌افزاری، سوالاتی با جواب بله یا خیر از کاربر مربوطه پرسیده می‌شود و بر اساس پاسخ سوالات به تشخیص عیوب پرداخته می‌شود. این روش نه تنها زمان‌بر است بلکه به علت دخالت نیروی انسانی ممکن است دچار خطاهای متعددی باشد و عیوب مدار راه به درستی قابل تشخیص نباشد. در روش [Anitha, 2017] با استفاده از یک ماشین متحرک روی ریل، عیوب مربوط به ریل، شکستگی‌های ریل، اتصال پیچ و مهره‌ها و هم‌چنین موانع بررسی می‌شود. در این مقاله عیوب محدودی بررسی شده و تنها در مواقع عدم وجود قطار بر روی

تغییر حالت‌های مدل پتری شبیه‌سازی شده، می‌توان تشخیص داد کدام مدار راه یا مدار راه‌ها معیوب شده‌اند و نوع این عیوب چیست. این شبکه هم‌چنین قادر است عیوب حاصل از مدار راه را به‌طور هم‌زمان و به موقع تشخیص دهد.

۲. تشخیص و ایزولاسیون عیب

از جمله ویژگی‌های بسیار مهم برای هر سیستم، ایمنی و قابلیت اطمینان است، که این امر را می‌توان با از بین بردن ضعف‌ها و عیوب احتمالی سیستم تضمین نمود. یکی از روش‌های دستیابی به ایمنی و قابلیت اطمینان، پیاده‌سازی سیستم‌های تشخیص و ایزولاسیون عیب است. تشخیص عیب مشخص می‌کند که آیا عیبی در سیستم وجود دارد یا نه، به دنبال آن ایزولاسیون عیب مکان عیب را مشخص می‌کند. روش تشخیص و ایزولاسیون عیب شامل دو روش بدون مدل و روش مبتنی بر مدل است. روش‌های عیب‌یابی که به مدل صریح ریاضی سیستم بستگی ندارند، روش بدون مدل نامیده می‌شوند. روش بدون مدل را می‌توان به دو دسته‌ی روش افزونگی سخت‌افزاری و روش مبتنی بر سیگنال تقسیم‌بندی نمود. در روش تشخیص خطا مبتنی بر مدل، با اندازه‌گیری یک یا چند متغیر و با استفاده از ارتباط تعریف شده بین پارامترهای سیستم، ورودی‌ها، خروجی‌ها و متغیرهای حالت به تشخیص تغییراتی که می‌تواند توسط خطا ایجاد شده باشد، پرداخته می‌شود. روش مبتنی بر مدل نیز به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود؛ روش تحلیلی، روش مبتنی بر داده و روش مبتنی بر دانش. روش مبتنی بر دانش، از دانش تخصصی برای تعریف یک مدل کیفی از سیستم استفاده می‌کند. از جمله روش‌های مبتنی بر دانش می‌توان به شبکه‌های پتری اشاره نمود. در این مقاله نیز از یک شبکه پتری جهت تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه TI21-M استفاده شده است. در بخش بعد شبکه‌های پتری مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

گسسته با استفاده از شبکه‌های پتری [Liu et al. 2018] و [Ran et al. 2017]، تشخیص خطای ترانسفورماتورها با استفاده از شبکه‌های پتری [Omidzadeh and Ghorbani, 2015]، تشخیص عیب در سیستم سیگنالینگ راه‌آهن [Durmus 2014]، عیب‌یابی سیستم‌های رویداد گسسته با استفاده از شبکه‌های پتری ترکیبی [Hokmabad et al. 2012]، هم‌چنین تشخیص خطا در سیستم‌های قدرت بر اساس شبکه‌های پتری فازی [Pamuk, 2012]، [Xiao-] [long and Ran, 2007] و [Sun et al. 2004]، مدل شناسایی رفتار غیرقابل مشاهده در سیستم‌های رویداد گسسته با استفاده از شبکه‌های پتری پایش اتوماسیون توزیع با استفاده از مدل‌سازی شبکه‌های پتری [Saki and Lesani, 2011]، دسترس‌پذیری سیستم مدار راه با استفاده از شبکه‌های پتری [Patra and Kumar, 1997] و هم‌چنین پتری نت تصادفی برای تشخیص و ایزولاسیون عیب در سیستم‌های رویداد گسسته [Lefebvre and Leclercq, 2011] اشاره نمود. در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از شبکه‌های پتری به عنوان روشی جدید به بررسی و شناسایی عیوب مدار راه پرداخته شود.

در این مقاله از آنجا که دسترسی به یک مدار راه فرکانس صوتی TI21-M مشکل و هزینه‌بر است، ابتدا مدل این مدار راه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود و داده‌های حاصل از آن، به عنوان ورودی‌های سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس یک شبکه پتری به عنوان ابزاری جهت تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه به کار گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی مدل پتری مورد نظر از محیط استیت‌فلو در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. بدین منظور ابتدا مدل پتری تغییرات ولتاژ و جریان اجزای مختلف مدار راه، تغییرات مقاومت کابل‌ها و تغییرات امپدانس ریل در محیط استیت‌فلو متلب شبیه‌سازی می‌شود. سپس با توجه به

۳. شبکه‌های پتری

که در آن $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ یک مجموعه‌ی متناهی از مکان‌ها است، $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ یک مجموعه‌ی متناهی از گذارها است، $W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ تابع وزن کمان‌ها است، $M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ تابع نشان‌گذاری اولیه است و $P \cap T = \emptyset$ و $P \cup T \neq \emptyset$ هم‌چنین تعریف می‌کنیم $I(t_j)$ و $O(t_j)$ را به ترتیب مجموعه‌هایی از مکان‌های ورودی و مکان‌های خروجی گذار t_j به طوری که:

$$I(t_j) = \{p_i \in P: (p_i, t_j) \in F\} \quad (2)$$

$$O(t_j) = \{p_i \in P: (t_j, p_i) \in F\} \quad (3)$$

در شکل ۱ الف یک نمونه شبکه پتری قابل مشاهده است که در آن:

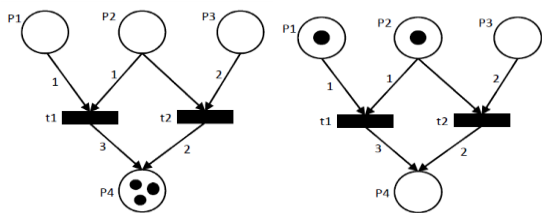
$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$$

$$T = \{t_1, t_2\}$$

$$M_0 = \{1, 1, 0, 0\}$$

$$I(t_1) = \{p_1, p_2\}, I(t_2) = \{p_2, p_3\}$$

$$O(t_1) = \{p_4\}, O(t_2) = \{p_4\}$$



شکل ۱. ب

شکل ۱. الف

شکل ۱. الف شبکه پتریا حالت نشان‌دار اولیه

شکل ۱. ب شبکه پتری با حالت نشان‌دار ثانویه

شبکه پتری یک ابزار گرافیکی قدرتمند است که معمولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های رویدادگسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. نظریه‌ی شبکه‌های پتری نخستین بار در سال ۱۹۶۲ توسط کارل آدام پتری در رساله دکتری ایشان ارائه شد. شبکه‌های پتری در طول زمان کامل‌تر شدند و مفاهیم کاربردی‌تر و جدیدتری به مفاهیم مورد استفاده‌ی آن افزوده شد. از جمله این مفاهیم می‌توان به افزوده شدن زمان قطعی، زمان تصادفی و رنگ اشاره نمود. برخی از این مفاهیم منجر به تولید شبکه‌های خاصی شدند که به طور نمونه می‌توان به شبکه‌های پتری رنگی، شبکه‌های پتری زمان‌دار و شبکه‌های پتری سلسله‌مراتبی اشاره نمود.

۳-۱- ساختار شبکه‌های پتری

هر شبکه پتریاز چهار عنصر اصلی تشکیل شده است. این عناصر عبارتند از: مکان که به صورت یک حباب نمایش داده می‌شود و نمایان‌گر یک حالت از سیستم است، گذار که به صورت یک میله نشان داده می‌شود و نمایان‌گر عمل یا رویدادی است که باعث انتقال از یک حالت به حالت دیگر می‌شود، نشان‌ها که در داخل مکان‌ها قرار می‌گیرند و مجموعه‌ی نشان‌ها بیان‌گر حالت جاری سیستم است، کمان که مسیری جهت‌دار است و یک مکان را به یک گذار و یا یک گذار را به یک مکان مرتبط می‌کند [Durmus, 2014].

۳-۲ بیان ریاضی شبکه‌های پتری

به طور کلی یک شبکه پتریه صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PN = (P, T, F, W, M_0) \quad (1)$$

در شبکه‌های پتری گسسته، معادلات تغییر حالت و

جابجایی نشان‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

روش‌های مختلف آنالیز خطا مثل آنالیز درخت معایب، آنالیز مدهای خرابی و تاثیرات آن، آنالیز عملکرد و خطرات و ... به دست آورد.

با توجه به توضیحات فوق، ابتدا مدل پتری یک سیستم در حالت نرمال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PN = (P_N, T_N, F_N, W_N, M_{0N}) \quad (6)$$

که در آن:

- $P_N = \{p_{N1}, p_{N2}, \dots, p_{Nk}\}$ یک مجموعه‌ی متناهی از مکان‌ها در حالت نرمال است،
- $T_N = \{t_{N1}, t_{N2}, \dots, t_{Nk}\}$ یک مجموعه‌ی متناهی از گذارها در حالت نرمال است،
- $F_N \subseteq (P_N \times T_N) \cup (T_N \times P_N)$ یک مجموعه از کمان‌ها در حالت نرمال است،
- $W_N: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ تابع وزن کمان‌ها در حالت نرمال است،
- $M_{0N}: P_N \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ تابع نشان‌گذاری اولیه در حالت نرمال است،

برای مدل‌سازی حالت‌های خرابی مجموعه‌ای از مکان‌ها که حالت‌های معیوب را نشان می‌دهند و مجموعه‌ای از گذارها که رویدادهای معیوب را نشان می‌دهند، به مدل پتری سیستم در حالت نرمال اضافه می‌شود. مجموعه مکان‌های معیوب به صورت $P_F = \{p_{F1}, p_{F2}, \dots, p_{Fk}\}$ و مجموعه‌ی گذارهای معیوب به صورت $T_F = \{t_{F1}, t_{F2}, \dots, t_{Fk}\}$ نشان داده می‌شود.

با اضافه شدن حالت‌های خرابی مدل پتری جدیدی به دست می‌آید که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = (P, T, F, W, M_0) \quad (7)$$

که در آن

$$M_k = M_{k-1} + A \cdot U_k \quad (4)$$

که M_k و M_{k-1} حالت‌های نشان‌دار به ترتیب قبل و بعد از شلیک گذار یا گذارها را نشان می‌دهد، U_k گذار یا گذارهای شلیک شده را نشان می‌دهد و A بیانگر ماتریس تلاقی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(p_i, i_j) = \begin{cases} W(p_j, t_i), & \text{if } (p_j, t_i) \in F \\ W(t_j, p_i), & \text{if } (t_j, p_i) \in F \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

ماتریس A یک ماتریس m در n است که m تعداد عناصر مجموعه‌ی P و n تعداد عناصر مجموعه‌ی T را نشان می‌دهد. به‌طور مثال در شبکه پتریشکل ۱ الف حالت نشان‌دار اولیه به صورت $M_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ است. با شلیک شدن گذار t_1 برداری به صورت $U_k = [1 \ 0]^T$ خواهیم داشت و ماتریس تلاقی به صورت $A = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 3 \\ 0 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix}^T$ است. در نتیجه حالت نشان‌دار بعد از شلیک گذار t_1 با توجه به فرمول ۴ برابر است با $M_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 3]^T$ که در شکل ۱ ب نیز مشخص است [Durmus, 2014].

۳-۳- عیب‌یابی بر اساس شبکه‌های پتری

در این قسمت یک مدل کاربردی برای عیب‌یابی بر اساس شبکه‌های پتری ارائه می‌شود و در واقع روش مدل‌سازی خرابی‌ها نشان داده می‌شود. در این چارچوب دو نوع مدل تولید شده است:

۱. مدل بدون خرابی (عملکرد نرمال)

۲. مدل با خرابی (عملکرد معیوب)

مدل‌های دارای خطا و انحراف از شرایط نرمال را می‌توان با اضافه کردن رفتار خرابی یا نامطلوب بر مدل نرمال به دست آورد. توجه شود که رفتار خرابی یا نامطلوب را می‌توان از

$$P = P_N \cup P_F \quad (8)$$

$$T = T_N \cup T_F \quad (9)$$

۴. مدار راه

برای تشخیص حضور وسیله نقلیه‌ی ریلی در قسمت خاصی از یک خط، از مداراتی به نام مدار راه استفاده می‌گردد. از زمان اختراع مدار راه در سال ۱۸۷۲ در آمریکا، تاکنون تحولات زیادی در این سیستم به وقوع پیوسته است. در حال حاضر در راه‌آهن‌های کشورهای مختلف دنیا مدار راه‌های متنوعی مورد استفاده می‌باشند، از جمله مدار راه جریان مستقیم، مدار راه جریان متناوب، مدار راه ایمپالسی و مدار راه فرکانس صوتی. به منظور تشخیص حضور یا عدم حضور قطار در هر قسمت از مسیر، هر خط ریلی به یک یا چند تراک تقسیم‌بندی می‌شود. هر تراک می‌تواند شامل یک یا چند مدار راه باشد. یک مدار راه ساده شامل چند جزء اصلی است؛ فرستنده، گیرنده، کابل و عایق. در هر مدار راه فرستنده و گیرنده به وسیله‌ی کابل به ترتیب به ابتدا و انتهای تراک مربوطه متصل می‌شوند و از طریق ریل با یکدیگر در ارتباط‌اند. از آنجا که مدار راه‌ها حامل جریان الکتریکی هستند، برای جداسازی مدارهای الکتریکی از عایق‌بندی‌های فیزیکی در طول ریل یا مفصل‌های جداساز الکتریکی استفاده می‌شود. شکل ۲ نمای کلی یک مدار راه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیگنال از طریق یک فرستنده وارد ریل شده و سپس گیرنده آن را دریافت می‌کند. در صورت عدم حضور قطار، رله‌ی تراک انرژی‌دار می‌شود که نشان‌دهنده‌ی آزاد بودن تراک است. در صورت حضور قطار، محور بین چرخ‌های قطار اتصال کوتاه ایجاد کرده و مانع از انرژی‌دار شدن رله‌ی تراک می‌شود که نشان‌دهنده‌ی اشغال بودن تراک است [MirAbadi, 2006].

$$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P) \quad \bullet$$

کمان‌ها در حالت کلی است،

$$W: F \rightarrow \{1,2,3, \dots\} \quad \bullet$$

کلی است،

$$M_0: P \rightarrow \{0,1,2,3, \dots\} \quad \bullet$$

در حالت کلی است،

شناسایی مجموعه خطرات احتمالی برای یک طراحی ایمن امری ضروری است. در مورد چارچوب ارائه شده در این پروژه نیز شناسایی مجموعه‌ی خطرات برای ارائه‌ی معیارهای تایید ایمنی امر مهمی است. اگر هر خطر را با F_i نشان دهیم مجموعه‌ی خطرات به صورت زیر خواهد بود:

$$FS = \{F_1, F_2, \dots, F_n\} \quad (10)$$

هر خطر به یک مجموعه از حالت‌های سیستم مربوط است، که این روابط با Φ نشان داده می‌شود:

$$\Phi: F_i \rightarrow p_{Fi} = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\} \quad (11)$$

به طور مشابه مجموعه خطرات FS مطابق است با:

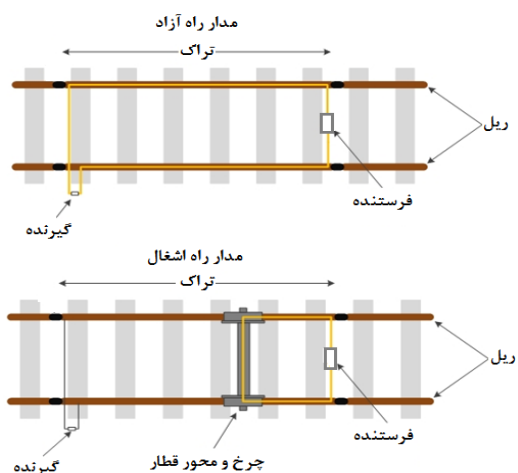
$$\Phi: FS \rightarrow R(M_0)_{FS} = \{p_{F1}, p_{F2}, \dots, p_{Fn}\} \quad (12)$$

معیار تایید ایمنی به صورت زیر خواهد بود:

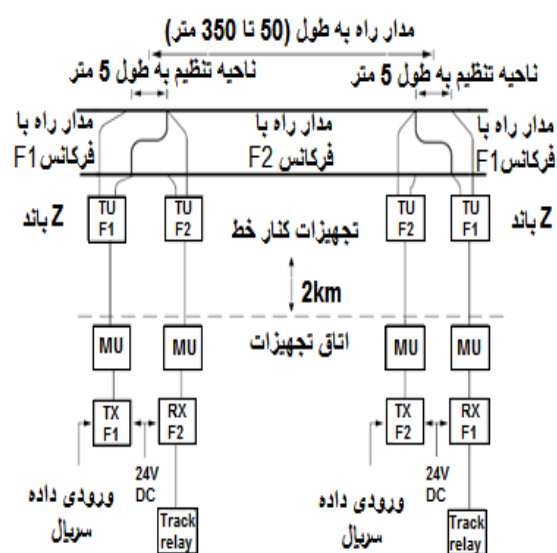
$$R(M_0)_{NS} \cap R(M_0)_{FS} = \emptyset \quad (13)$$

در رابطه‌ی فوق $R(M_0)_{NS}$ مجموعه حالت‌های دسترس‌پذیر از حالت اولیه‌ی مدل پتری Q است که در آن هیچ گذار معیوبی شلیک نشود و $R(M_0)_{NS}$ مجموعه حالت‌های دسترس‌پذیر از حالت اولیه‌ی مدل پتری Q است که در آن حداقل یک گذار معیوب شلیک شود [She et al. 2014].

فرکانسی برای تجهیزات به کار گرفته شده که در چهار جفت به صورت F1/F2, F3/F4, F5/F6, F7/F8 تقسیم‌بندی می‌شوند. بر روی یک خط معمولاً یک جفت از این فرکانس‌ها به صورت متناوب به کار گرفته می‌شود. جدول ۱ فرکانس اختصاصی به هر باندها را نشان می‌دهد. نحوه‌ی چیدمان این مدارها را با فرکانس‌های مختلف بر روی یک خط چهاربانه نشان می‌دهد [Bombardier Transportation, 2008].



شکل ۲. مدار راه



شکل ۳. مدار راه TI21-M

جدول ۱. باندهای فرکانسی به کار گرفته شده در مدار راه TI21-M

خط	کانال	فرکانس نامی	فرکانس واقعی
۱	F1 F2	۶.۱ کیلو هرتز ۷.۷ کیلو هرتز	۶ تا ۶.۱ کیلو هرتز ۷.۶ تا ۷.۸ کیلو هرتز
۲	F5 F6	۵.۷ کیلو هرتز ۷.۳ کیلو هرتز	۵.۶ تا ۵.۸ کیلو هرتز ۷.۲ تا ۷.۴ کیلو هرتز
۳	F3 F4	۶.۹ کیلو هرتز ۸.۵ کیلو هرتز	۶.۸ تا ۷ کیلو هرتز ۸.۴ تا ۸.۶ کیلو هرتز
۴	F7 F8	۶.۵ کیلو هرتز ۸.۱ کیلو هرتز	۶.۴ تا ۶.۶ کیلو هرتز ۸ تا ۸.۲ کیلو هرتز

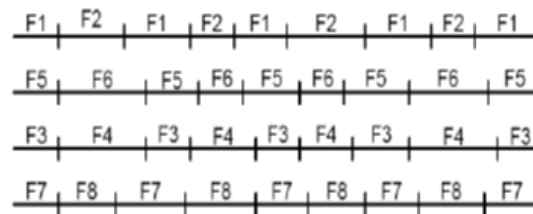
۵. مدار راه TI21-M

مدار راه TI21-M، یک نوع مدار راه فرکانس صوتی بدون عایق فیزیکی است که برای استفاده در خطوط الکتریکی AC یا DC با سطح تداخل بالا (ناشی از هارمونیک ۵۰ هرتز تراکشن) طراحی شده است. مدار راه TI21-M، برای خطوط قطار شهری مناسب بوده و الزامات عملکردی مربوط به آن را به خوبی تامین می‌کند. این نوع مدار راه می‌تواند ۵۰ تا ۳۵۰ متر طول داشته باشد. فرستنده و گیرنده‌ی مربوطه نیز می‌تواند تا فاصله‌ی ۲ کیلومتر در اتاق تجهیزات قرار گیرد.

به منظور تشخیص قطار به صورت ایمن، مدار راه TI21-M هم‌چنین می‌تواند در سکشن‌های اشغال شده برای انتقال داده به قطار مورد استفاده قرار گیرد. این داده‌های رمزگذاری شده که از قسمت کنترل ارسال می‌شود از طریق یک لینک سریال وارد فرستنده می‌شود. به منظور برآورده کردن هر دو الزام (تشخیص قطار و انتقال داده به قطار)، مدار راه در محدوده‌ی فرکانسی ۵ تا ۹ کیلو هرتز عمل می‌کند و سیگنال و داده‌های ارسالی به وسیله‌ی مدولاتوری با فرکانس ۲۰ هرتز مدوله می‌شود. این مدار راه می‌تواند حامل را تا نرخ ۱۰۰ هرتز مدوله کند. در شکل ۳ نمای کلی یک مدار راه TI21-M استاندارد نشان داده شده است. در مدار راه TI21-M هشت باندها

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M با استفاده از شبکه‌های پتری

به علت عدم دسترسی به این داده‌ها و هم‌چنین به منظور سهولت در کار، مدار راه TI21-M در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی شده و از داده‌های حاصل از مدل برای عیب‌یابی استفاده شده است. شکل ۶ مدل کلی یک مدار راه TI21-M را نشان می‌دهد [Bombardier Transportation, 2008].



شکل ۴. چیدمان مدار راه‌های TI21-M بر روی یک خط

چهاربانه

۲-۵ مدل‌سازی فرستنده

شکل ۷ مدار فرستنده‌ی مدار راه TI21-M را نشان می‌دهد. در یک مدار راه با فرکانس F1، فرستنده با استفاده از یک مدولاتور FSK اطلاعات را با استفاده از یک موج حامل با فرکانس ۶٫۱ کیلوهرتز مدوله می‌کند. نوع اطلاعات بستگی به مد ورودی مدولاتور دارد. در صورتی که ورودی مدولاتور در مد تشخیص قطار باشد، اطلاعات شامل یک موج مربعی با فرکانس ۲۰ هرتز است. در صورتی که ورودی مدولاتور در مد انتقال اطلاعات از تراک به قطار (DATA) باشد، اطلاعات حاوی داده‌های رمزگذاری شده‌ای است که از قسمت کنترلر اینترلاکینگ ارسال شده است. خروجی مدولاتور FSK یک موج سینوسی است که فرکانس آن با توجه به ورودی مدولاتور بین دو مقدار ۶ کیلوهرتز و ۶٫۲ کیلوهرتز تغییر می‌کند [Sandidzadeh and Dehghani, 2013].

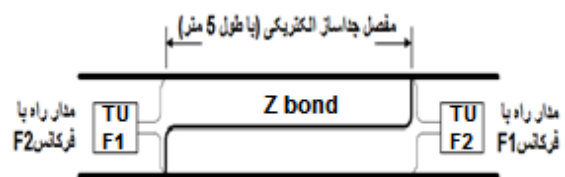
۳-۵ مدل‌سازی واحد تطبیق

واحد تطبیق وظیفه‌ی تطبیق امپدانس دو قسمت از یک مدار را بر عهده دارد. به عبارت دیگر در مدار راه TI21-M، واحد تطبیق با تطبیق امپدانس‌ها باعث انتقال حداکثر توان از فرستنده به واحد تنظیم مربوط به فرستنده و هم‌چنین از واحد تنظیم مربوط به گیرنده به گیرنده می‌شود. این واحد تنها از یک ترانسفورماتور تشکیل شده و هیچ‌گونه عنصر فعالی ندارد.

۱-۵ ایزولاسیون مدار راه TI21-M

در خطوطی که از مدار راه TI21-M استفاده می‌شود، مدار راه‌ها به وسیله‌ی عایق الکتریکی و از طریق ناحیه‌های تنظیم جداسازی می‌شوند. طول مفصل جداساز الکتریکی ۵ متر است. هر مفصل جداساز الکتریکی با فرکانس‌های دو مدار راه در ارتباط است. در شکل ۵ مفصل جداساز الکتریکی بین دو مدار راه یکی با فرکانس F1 و دیگری با فرکانس F2 قابل مشاهده است. ناحیه‌ی تنظیم شامل یک کابل به نام Zباند و دو واحد تنظیم‌کننده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. Zباند بین دو ریل نصب شده و در طول مفصل جداساز قرار دارد. دو واحد تنظیم‌کننده نیز بین دو ریل نصب شده‌اند و در دو انتهای مفصل جداساز قرار دارند.

برای عیب‌یابی یک مدار راه TI21-M، به یک سری داده‌های اندازه‌گیری شده نیاز است. در این مقاله از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی کنار خط، به عنوان داده‌های ورودی سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب، استفاده شده است.



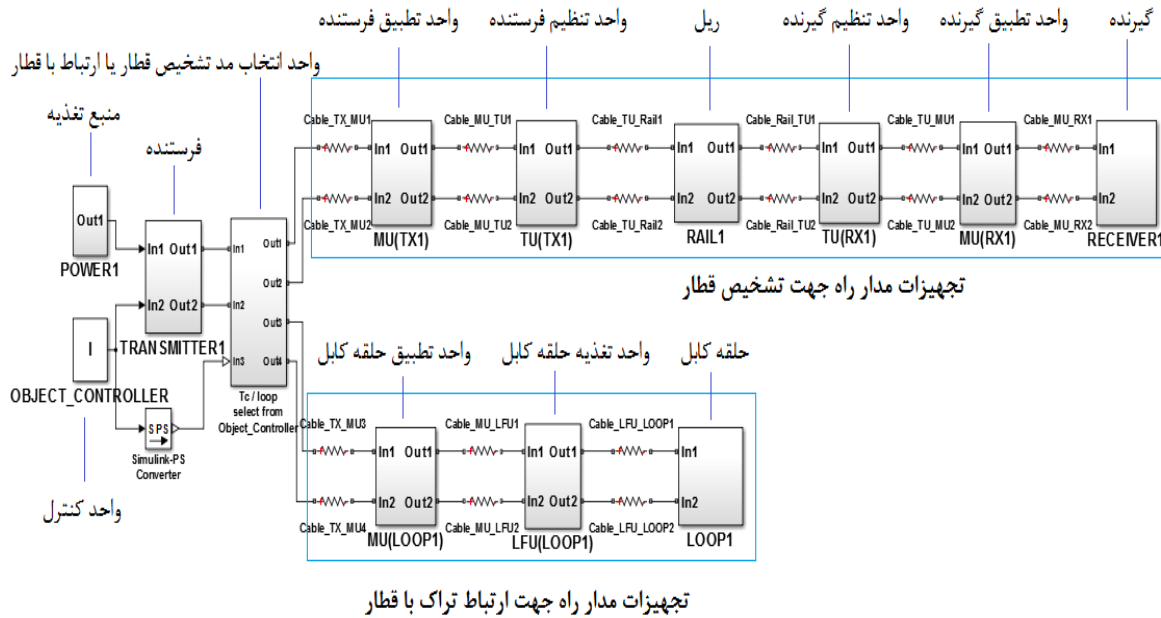
شکل ۵. ناحیه تنظیم

در رابطه فوق $N1$ تعداد دور سیم پیچ اولیهی ترانسفورمر $N2$ نسبت دور اولیه به ثانویهی ترانسفورماتور را می توان از رابطهی زیر به دست آورد.

تعداد دور سیم پیچ ثانویهی ترانسفورمر، $Z1$ امپدانس دیده شده از سیم پیچ اولیهی ترانسفورمر و $Z2$ امپدانس دیده شده از سیم پیچ ثانویهی ترانسفورمر است.

نسبت دور اولیه به ثانویهی ترانسفورماتور را می توان از رابطهی زیر به دست آورد.

$$N1/N2 = \sqrt{Z1/Z2} \quad (14)$$



شکل ۶. مدار راه TI21-M

- با اندوکتانس تشکیل شده از Z باند و 5 متر ریل موجود در مفصل جداساز رزونانس نموده و به شکل یک امپدانس بالا (قطب) به منظور خاتمه دادن به مدار راه عمل می کند.
- انرژی لازم را از فرستنده به مدار راه کوپل می کند.
- ابزار مناسبی را جهت تبدیل ولتاژ انتشار یافته در مدار راه به یک سیگنال مناسب جهت تحریک گیرنده ارائه می کند.

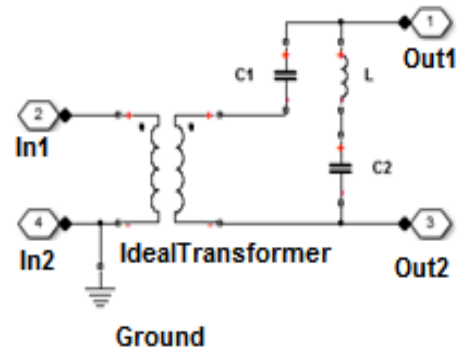
۴-۵ مدل سازی واحد تنظیم

ناحیهی تنظیم دارای دو واحد تنظیم کننده است که بین دو ریل نصب شده اند و در دو انتهای مفصل جداساز قرار دارند. شکل ۸ مدار یک واحد تنظیم نشان داده شده است. واحد تنظیم ویژگی های زیر را تامین می کند:

- در مقابل مدار راه مجاور واحد تنظیم مربوطه، امپدانس کمی (صفر) ارائه می کند و بنابراین از انتشار بیش از حد سیگنال مدار راه مجاور به مدار راه مربوطه جلوگیری می کند.

۵-۵ مدل‌سازی گیرنده

شکل ۹ مدار مربوط به گیرنده‌ی مدار راه TI21-M را نشان می‌دهد. در این گیرنده ابتدا سیگنال دریافتی وارد یک ترانسفورماتور می‌شود. وظیفه‌ی این ترانسفورماتور ایزوله نمودن گیرنده از دیگر قسمت‌ها و همچنین رساندن دامنه‌ی ولتاژ دریافتی به مقدار مناسب است.



شکل ۸. واحد تنظیم مدار راه TI21-M

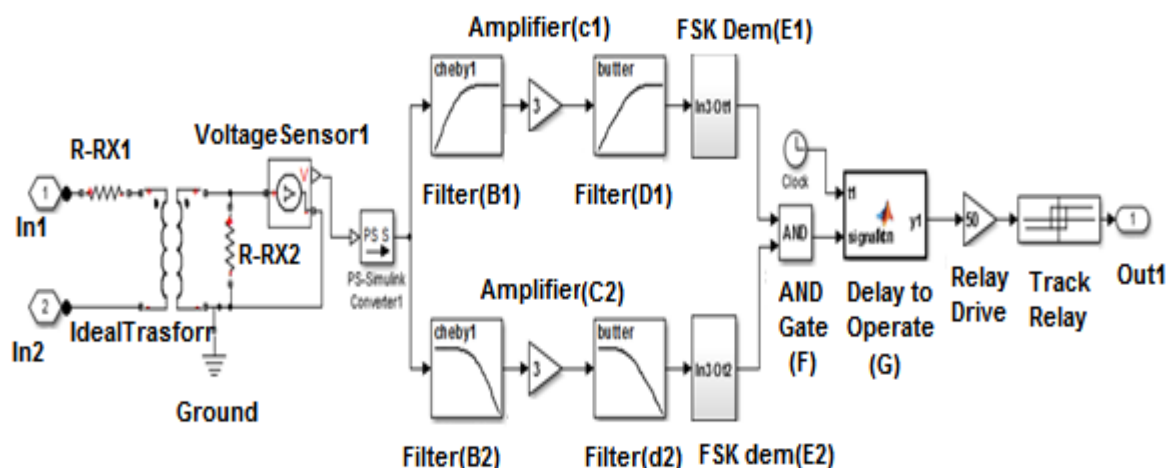
۶-۵ مدل‌سازی واحد تغذیه‌ی لوپ

واحد تغذیه‌ی لوپ برای کوپل سیگنال از فرستنده به حلقه‌ی کابل قرار گرفته در داخل ریل استفاده می‌شود. این حلقه‌ی کابل به منظور برقراری ارتباط بین تراک و قطار نصب شده است. هر واحد تغذیه‌ی لوپ می‌تواند، توان دریافتی از فرستنده را به یک حلقه‌ی کابل با طول 130 متر انتقال دهد. در واقع واحد تغذیه‌ی لوپ یک ترانسفورمر است که توان را از واحد تطبیق به حلقه‌ی لوپ انتقال می‌دهد. در واقع واحد تغذیه‌ی لوپ یک ترانسفورمر است که توان را از واحد تطبیق به حلقه‌ی لوپ انتقال می‌دهد. همان‌طور که گفته شد نسبت دور اولیه به ثانویه‌ی ترانسفورماتور را می‌توان از رابطه $\frac{N1}{N2} = \sqrt{\frac{Z1}{Z2}}$ به دست آورد. در رابطه‌ی فوق N1 تعداد دور سیم‌پیچ اولیه‌ی ترانسفورمر، N2 تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه‌ی ترانسفورمر، Z1 امپدانس دیده شده از سیم‌پیچ اولیه‌ی ترانسفورمر و Z2 امپدانس دیده شده از سیم‌پیچ ثانویه‌ی ترانسفورمر است. در طول عملکرد حلقه‌ی کابل، فرستنده دیگر قادر به تغذیه‌ی مدار راه نیست، این عمل به‌وسیله‌ی اینترلاکینگ انجام می‌شود.

سپس برای دمدوله کردن موج سینوسی، سیگنال وارد دو شاخه می‌شود. در شاخه‌ی بالا سیگنال از یک فیلتر بالاگذر مرتبه یک عبور کرده، پس از آن سیگنال به‌وسیله‌ی یک تقویت‌کننده، تقویت شده و دوباره وارد یک فیلتر بالاگذر درجه یک می‌شود. در طی این سه مرحله، فرکانس‌های پایین سیگنال فیلتر می‌شود و سپس وارد یک دمدولاتور FSK شده و یک موج مربعی تولید می‌شود. در شاخه‌ی بالا سیگنال از یک فیلتر پایین‌گذر مرتبه یک عبور کرده، پس از آن به‌وسیله‌ی یک تقویت‌کننده، سیگنال تقویت شده و دوباره وارد یک فیلتر پایین‌گذر درجه یک می‌شود. در طی این سه مرحله، فرکانس‌های بالای سیگنال فیلتر می‌شود و سپس وارد یک دمدولاتور FSK شده و یک موج مربعی تولید می‌شود.

در حالتی که مدار راه آزاد است این دو موج مربعی باید دارای فرکانس یکسان ۲۰ هرتز ولی فاز مخالف باشند. هر دو موج مربعی تولیدشده وارد یک گیت منطقی شده و در صورتی که هر دو موج دارای فرکانس یکسان ولی فاز مخالف باشند، خروجی گیت مقدار ثابت ۱ خواهد بود [Sandidzadeh

and Dehghani 2013].



شکل ۹. گیرنده مدار راه TI21

شکل ۱۰ مدل شبیه‌سازی شده یک تراک به $R_{R1R2} = \frac{1}{G_{R1R2}}$ طول ۲۰ متر مشاهده می‌شود [Teng et al. 2013].

۸-۵ خرابی‌های مدار راه

قسمت عمده‌ی عیوب گزارش‌شده در یک مدار راه، مربوط به قطع شدگی کابل‌های ارتباطی واحدهای مختلف و حلقه‌ی کابل ارتباط از تراک به قطار می‌باشد. این خرابی‌ها عمدتاً مرتبط به هوای گرم و یا زنگ‌زدگی می‌باشند و با افزایش مقاومت اتصال نمایان می‌گردند. خرابی رله و یا گیرنده که منجر به عدم توانایی انرژی‌دار کردن رله می‌شود و یا شکستگی ریل و یا خرابی منبع تغذیه که منجر به اشغال اعلام شدن دائم خط می‌گردد نیز از دیگر عوامل بروز خرابی در یک مدار راه می‌باشد، همچنین خرابی اجزایی مانند منبع تغذیه، فرستنده، واحد تنظیم، واحد تطبیق و واحد تغذیه‌ی لوپ ممکن است باعث عدم عملکرد

۷-۵ مدل‌سازی ریل

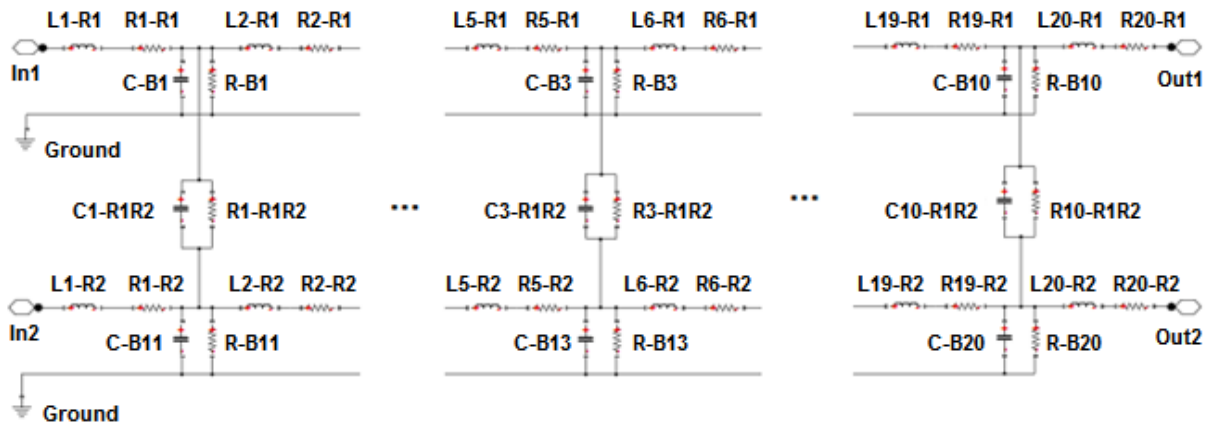
خطوط ریل از آهن ساخته شده‌اند که در برابر جریان DC مقاومت اهمی کمی دارند ولی در برابر جریان AC، همراه با افزایش فرکانس، مقاومت نیز افزایش پیدا می‌کند. امپدانس بالاست، از جریانی که می‌تواند به راحتی بین دو ریل تراک مربوطه به صورت عرضی جاری شود، ایجاد می‌شود؛ که شامل نشتی بین دارنده‌ی ریل، اسلیپرها و زمین است. خط راه‌آهن می‌تواند به عنوان یک خط انتقال با پارامترهای توزیع در نظر گرفته شود. پارامترهای به اصطلاح توزیع برای هر خط انتقال در یک طول واحد عبارتند از؛ مقاومت ریل R_{R1} و R_{R2} ، ظرفیت سلفی ریل L_{R1} و L_{R2} ، ظرفیت خازنی بالاست C_B ، هدایت جاری نشتی G_B که معادل است با مقاومت بالاست $R_B = \frac{1}{G_B}$ ، ظرفیت خازنی بین دو ریل G_{R1R2} و هدایت جاری نشتی بین دو ریل G_{R1R2} که معادل است با مقاومت بین دو ریل

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M با استفاده از شبکه‌های پتری

توجه به این‌که عیوب متعددی ممکن است برای یک مدار راه رخ دهد، به هر عیب یک کد اختصاص داده شده است که جدول ۲ عیوب مدار راه و کدهای مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد.

صحیح مدار راه شود. در شرایط رطوبت با تغییر در مقاومت بالاست و یا افزایش نشتی جریان ریل، عملکرد مدار راه می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد که تنظیم ولتاژ فرستنده برای انتخاب میزان جریان و ولتاژ اعمال شونده به مدار تنظیم لازم است. با



شکل ۱۰. مدل‌سازی ریل مدار راه TI21-M

جدول ۲. خرابی های مدار راه TI21-M و کدهای مربوط به هر خرابی

نوع خرابی	معیوب	نزدیک به سالم	عیب
خرابی منبع تغذیه	F1	—	N1
خرابی فرستنده	F2	—	N2
افزایش مقاومت کابل بین فرستنده و واحد تطبیق مربوط به آن بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F3	NF3	N3
خرابی واحد تطبیق مربوط به فرستنده	F4	—	N4
افزایش مقاومت کابل بین واحد تطبیق و واحد تنظیم سازی مربوط به فرستنده بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F5	NF5	N5
خرابی واحد تنظیم مربوط به فرستنده	F6	—	N6
افزایش مقاومت کابل بین واحد تنظیم سازی مربوط به فرستنده و ریل بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F7	NF7	N7
شکستگی ریل	F8	—	N8
افزایش مقاومت کابل بین ریل و واحد تنظیم سازی مربوط به گیرنده بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F9	NF9	N9
خرابی واحد تنظیم مربوط به گیرنده	F10	—	N10
افزایش مقاومت کابل بین واحد تنظیم سازی و واحد تطبیق مربوط به گیرنده بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F11	NF11	N11
خرابی واحد تطبیق مربوط به گیرنده	F12	—	N12
افزایش مقاومت کابل بین واحد تطبیق مربوط به گیرنده و گیرنده بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F13	NF13	N13
عدم توانایی گیرنده در انرژی دار کردن رله	F14	—	N14
خرابی رله	F15	—	N15
افزایش مقاومت کابل بین فرستنده و واحد تطبیق مربوط به حلقه کابل بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F16	NF16	N16
خرابی واحد تطبیق مربوط به واحد تغذیه ی حلقه	F17	—	N17
افزایش مقاومت کابل بین واحد تطبیق مربوط به حلقه کابل و حلقه کابل بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F18	NF18	N18
افزایش مقاومت حلقه ی کابل ارتباط بین تراک و قطار بیش از حد مجاز و یا قطع شدن کامل آن	F19	—	N19

۶. مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه پتری

شبکه‌های پتری معمولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های رویداد گسسته یا سیستم‌هایی که به نحوی بتوان رفتار آن‌ها را گسسته در نظر گرفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدار راه یک سیستم دینامیک پیوسته است. برای مدل‌سازی و تشخیص عیوب این سیستم با استفاده از شبکه‌های پتری باید رفتار آن را به صورت گسسته در نظر گرفت.

مدار راه TI21-M دارای ۲۰ جزء است، که ۱۱ جزء اصلی آن عبارتند از منبع تغذیه، فرستنده، واحد تطبیق مربوط به فرستنده، واحد تنظیم مربوط به فرستنده، ریل، واحد تنظیم مربوط به گیرنده، واحد تطبیق مربوط به گیرنده، گیرنده، رله تراک، محرک رله‌ی تراک، واحد تطبیق مربوط به حلقه‌ی کابل ارتباط خط با قطار و واحد تغذیه‌ی حلقه و ۹ جزء دیگر شامل کابل‌های ارتباطی بین اجزای اصلی سیستم است که عبارتند از کابل بین فرستنده و واحد تطبیق مربوط به فرستنده، کابل بین واحد تطبیق مربوط به فرستنده و واحد تنظیم مربوط به فرستنده، کابل بین واحد تنظیم مربوط به فرستنده و ریل، کابل بین ریل و واحد تنظیم مربوط به گیرنده، کابل بین واحد تنظیم مربوط به گیرنده و واحد تطبیق مربوط به گیرنده، کابل بین واحد تطبیق مربوط به گیرنده و گیرنده و فرستنده و واحد تطبیق مربوط به حلقه‌ی کابل ارتباط خط با قطار، کابل بین واحد تطبیق مربوط به حلقه‌ی کابل ارتباط خط با قطار و واحد تغذیه‌ی حلقه و حلقه کابل.

هر یک از ۱۱ جزء اصلی مدار راه TI21-M برای عملکرد خود در شرایط مختلف حضور یا عدم حضور قطار، دارای یک محدوده ولتاژ و یا جریان خاصی هستند. جدول ۳ محدوده‌ی ولتاژ و یا جریان این اجزاء را در عدم حضور قطار و جدول ۴ ولتاژ و جریان این اجزاء را در حضور قطار نشان می‌دهد

[Bombardier Transportation, 2008]

کابل‌های ارتباطی بین اجزاء اصلی نیز با توجه به طول، سطح مقطع و جنسشان دارای مقاومت‌های مشخصی هستند. جدول ۵ مقاومت کابل‌ها را در سه حالت مختلف نرمال، نزدیک به بروز عیب و معیوب نشان می‌دهد. امپدانس ریل نیز می‌تواند بین ۸ تا ۱۴ اهم باشد. با توجه به محدوده‌های تعریف شده برای هر یک اجزاء، هر جزء اصلی می‌تواند دو حالت داشته باشد، یا در محدوده‌ی تعریف شده قرار دارد یا در محدوده‌ی تعریف شده قرار ندارد. به‌طور مثال ولتاژ واحد تنظیم مربوط به گیرنده در هنگام عدم حضور قطار در محدوده‌ی بالاتر از ۱ ولت قرار دارد و در هنگام حضور قطار در محدوده‌ی پایین‌تر از ۱ ولت. حال می‌توان رفتار مدار راه TI21-M را با توجه به تغییرات ولتاژ، جریان و امپدانس اجزای مختلف به صورت گسسته مدل‌سازی نمود.

جدول ۳. محدوده‌ی ولتاژ و جریان اجزاء مختلف مدار راه در عدم حضور قطار

حضور قطار

تجهیزات	ولتاژ خروجی	جریان
منبع تغذیه	۲۲ تا ۲۶ ولت DC	۳ تا ۱۰ آمپر DC
فرستنده	۳۵ تا ۶۰ ولت	۳ تا ۱۰ آمپر DC
واحد تطبیق فرستنده	۲۰ تا ۱۱۰ ولت	-
واحد تنظیم فرستنده	۲ تا ۵ ولت	-
ریل	حداقل ۰٫۱ ولت	حداقل ۳۵۰ میلی‌آمپر AC
واحد تنظیم گیرنده	حداقل ۱ ولت	-
واحد تطبیق گیرنده	حداقل ۱ ولت	-
گیرنده	حداقل ۰٫۱ ولت	حداقل ۰٫۱ آمپر AC
محرک رله	۴۰ تا ۶۵ ولت DC	-
رله	-	در حالت انرژی‌دار ۰٫۲ تا ۰٫۵ آمپر DC

جدول ۴. محدوده‌ی ولتاژ و جریان اجزاء مختلف مدار راه در

حضور قطار

تجهیزات	ولتاژ خروجی	جریان
منبع تغذیه	۲۲ تا ۲۶ ولت DC	۳ تا ۱۰ آمپر DC
فرستنده	۳۵ تا ۶۰ ولت	۳ تا ۱۰ آمپر DC
واحد تطبیق فرستنده	۲۰ تا ۱۱۰ ولت	-
واحد تنظیم فرستنده	۲ تا ۵ ولت	-
ریل	حداکثر ۰٫۱ ولت	-
واحد تنظیم گیرنده	حداکثر ۱ ولت	-
واحد تطبیق گیرنده	حداکثر ۱ ولت	-
گیرنده	حداکثر ۰٫۱ ولت	حداکثر ۰٫۱ آمپر AC
گیرنده	حداکثر ۰٫۱ ولت	-
محرك رله	حداکثر ۰٫۱ ولت DC	-
رله	-	در حالت بدون انرژی ۳۵۰ میلی‌آمپر DC

شکل ۱۱ مدل پتری شبیه‌سازی‌شده‌ی سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه T121-M با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. این مدل شامل ۱۹ خرابی است که با کدهای

جدول ۵. مقاومت کابل‌های ارتباطی

کابل رابط	حالت نرمال	حالت نزدیک به بروز عیب	حالت معیوب
کابل بین فرستنده و واحد تطبیق	حداکثر ۰٫۰۰۳ اهم	۰٫۰۰۳ تا ۰٫۰۰۵ اهم	۰٫۰۰۵ اهم به بالا
کابل بین گیرنده و واحد تطبیق	حداکثر ۰٫۰۰۳ اهم	۰٫۰۰۳ تا ۰٫۰۰۵ اهم	۰٫۰۰۵ اهم به بالا
کابل بین واحد تطبیق و واحد تنظیم	حداکثر ۵ اهم	۵ تا ۷ اهم	۷ اهم به بالا
کابل بین واحد تطبیق و واحد تغذیه‌ی لوپ	حداکثر ۵ اهم	۵ تا ۷ اهم	۷ اهم به بالا
کابل بین واحد تنظیم و ریل	حداکثر ۰٫۰۰۵ اهم	۰٫۰۰۵ تا ۰٫۱ اهم	۰٫۱ اهم به بالا
حلقه کابل متصل به واحد تغذیه‌ی لوپ	حداکثر ۱ اهم	۱ تا ۱٫۵ اهم	۱٫۵ اهم به بالا

در این مقاله با استفاده از شبکه‌های پتری، مدلی مبتنی بر دانش برای تشخیص و ایزولاسیون عیوب دو مدار راه T121-M با فرکانس‌های ۶۱۰۰ هرتز و ۷۷۰۰ هرتز که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند ارائه می‌شود. به منظور مدل‌سازی سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب با استفاده از شبکه‌های پتری از ابزار استیت‌فلو در سیمولینک متلب استفاده شده است.

در مدل‌سازی شبکه‌های پتری با استفاده از استیت‌فلو، هر حالت یا هر مکان با یک مربع (مستطیل) و هر گذار یا انتقال با یک کمان نشان داده می‌شود. برای انتقال از حالتی به حالت دیگر و یا به عبارت دیگر برای شلیک شدن یک گذار، نیاز است رویدادی رخ دهد یا تغییری در سیستم ایجاد شود. بدین منظور هر یک از گذارها دارای یک عبارت شرطی هستند. در صورتی که شرایط هر گذار برآورده شود، آن گذار شلیک می‌شود و انتقال از حالتی به حالت دیگر صورت می‌گیرد. در غیر این صورت سیستم در حالت قبل باقی می‌ماند.

F1, F2, ..., F19 نشان داده شده است و نوع خرابی مربوط به هر کد در جدول ۲ آمده است. این شبکه شامل ۵۹ مکان است که این مکان‌ها از طریق گذارها با یکدیگر در ارتباط هستند. لیست مکان‌ها و گذارها در قسمت پیوست مشخص شده است. بردار مکان‌ها و گذارها نیز به صورت زیر است که در جدول ۶ نام هر مکان در مدل پتری مشخص شده است.

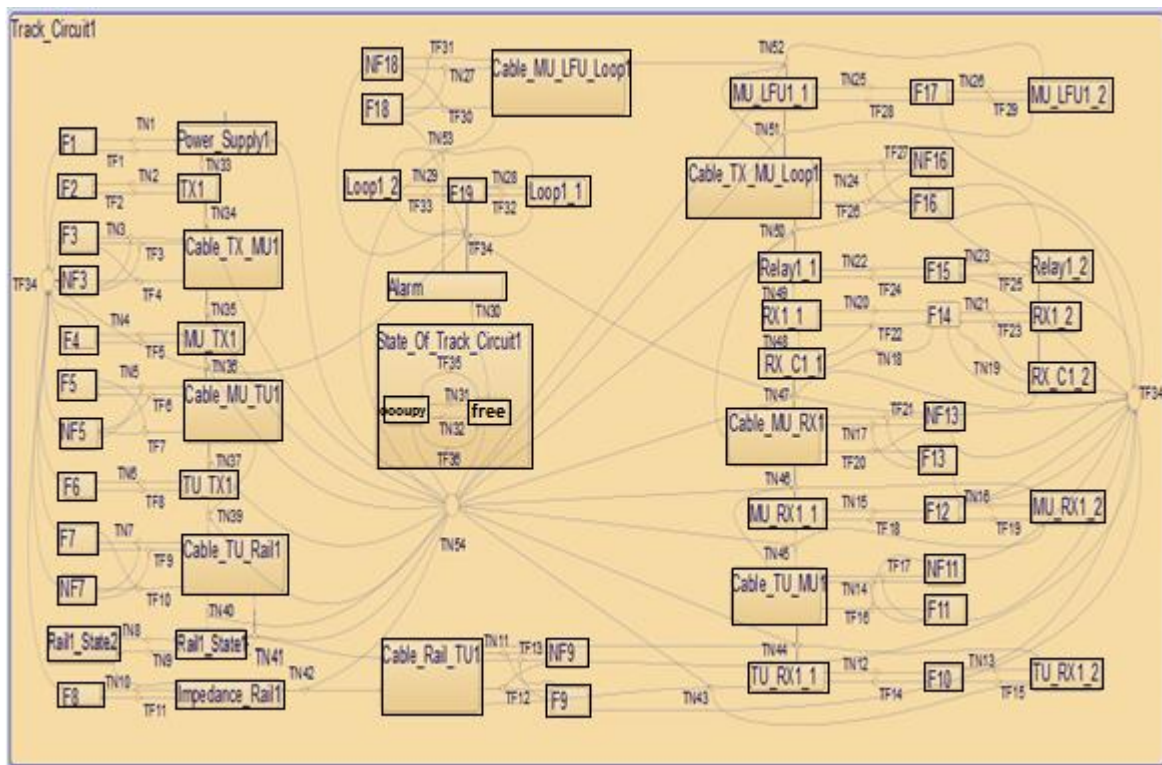
$$P = \quad (14)$$

$$[PN_1, PN_2, \dots, PN_{31}, PF_1, PF_2, \dots, PF_{27}, PF_{28}]$$

$$T = [TN_1, TN_2, \dots, TN_{56}, TF_1, TF_2, \dots, TF_{31}] \quad (15)$$

که $PN = [PN_1, PN_2, \dots, PN_{31}]$ مجموعه‌ی حالت‌هایی را نشان می‌دهد که سیستم در حالت نرمال است، $PF = [PF_1, PF_2, \dots, PF_{27}]$ مجموعه حالت‌های معیوب

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M با استفاده از شبکه‌های پتری



شکل ۱۱. مدل پتری سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M

نرمال یکی پس از دیگری شلیک شده و تمامی قسمت‌های مدار راه شامل منبع تغذیه، فرستنده، واحدهای تنظیم، واحدهای تطبیق، گیرنده، واحد تغذیه حلقه کابل، ریل و کابل‌های رابط بین قسمت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از رسیدن به انتهای شبکه، حالت آزاد یا اشغال بودن تراک نیز در مکان‌های PN_{31} یا PN_{30} مشخص می‌شود. پس از پایان یافتن یک مرحله، شبکه دوباره از مکان PN_1 اجرا شده و این روند تکرار می‌شود. در صورتی که عیبی در سیستم رخ دهد، یکی از گذارهای معیوب $TF = [TF_1, TF_2, \dots, TF_{31}]$ شلیک شده و شبکه به یکی از مکان‌های معیوب $PF = [PF_1, PF_2, \dots, PF_{27}]$ منتقل می‌شود، پس از مشخص شدن عیب، شبکه وارد مکان PF_{28} که حالت هشدار را نشان می‌دهد شده، سپس وارد مکان PN_{31} یا PN_{30} می‌شود و حالت آزاد یا اشغال بودن مدار راه را نشان می‌دهد.

و PF_{28} حالت هشدار را نشان می‌دهند. همچنین $TN = [TN_1, TN_2, \dots, TN_{56}]$ مجموعه گذارهایی که سیستم را به حالت نرمال می‌برد و $TF = [TF_1, TF_2, \dots, TF_{31}]$ مجموعه گذارهایی که سیستم را به حالت معیوب می‌برد را نشان می‌دهد.

بردار نشان‌گذاری اولیه که مقادیر اولیه هر مکان را نشان می‌دهد به صورت زیر است:

$$M_0 = [1, 0, 0, \dots, 0]_{59 \times 1}$$

در حالت اولیه مدار راه در مکان PN_1 قرار گرفته و ولتاژ خروجی منبع تغذیه آن بررسی می‌شود. در صورت سالم بودن منبع تغذیه، گذار TN_1 شلیک شده و مدار راه به مکان PN_2 منتقل می‌شود، در این مکان ولتاژ خروجی فرستنده مدار راه مورد بررسی قرار گرفته و در صورت سالم بودن گذار TN_2 شلیک شده و مدار راه به مکان PN_3 منتقل می‌شود. در صورتی که هیچ خرابی در مدار راه وجود نداشته باشد گذارهای

جدول ۶. نام مکان‌ها در مدل پتری سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه

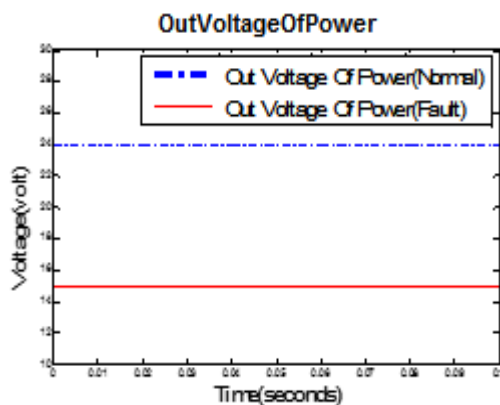
مکان	نام	مکان	نام
PN1	PoweSupply1	PF1	F1
PN2	TX1	PF2	F2
PN3	Cable-TX-MU1	PF3	F3
PN4	MU-TX1	PF4	NF3
PN5	Cable-MU-TU1	PF5	F4
PN6	TU-TX1	PF6	F5
PN7	Rail1_State1	PF7	NF5
PN8	Rail1_State2	PF8	F6
PN9	Impedance_Rail1	PF9	F7
PN10	Cable-Rail-TU1	PF10	NF7
PN11	TU-RX1-Free	PF11	F8
PN12	TU-RX1-Occupy	PF12	F9
PN13	Cable-TU-MU1	PF13	NF9
PN14	MU-RX1-Free	PF14	F10
PN15	MU-RX1-Occupy	PF15	F11
PN16	Cable-MU-RX1	PF16	NF11
PN17	RX1-Free	PF17	F12
PN18	RX1-Occupy	PF18	F13
PN19	Relay-Drive1-Free	PF19	NF13
PN20	Relay-Drive1-Occupy	PF20	F14
PN21	Relay1-Free	PF21	F15
PN22	Relay1-Occupy	PF22	F16
PN23	Cable-TX-MU-Loop1	PF23	NF16
PN24	MU-LFU1-Free	PF24	F17
PN25	MU-LFU1-Occupy	PF25	F18
PN26	Cable-MU-LFU1	PF26	NF18
PN27	Loop1-Free	PF27	F19
PN28	Loop1-Occupy	PF28	Fault
PN29	Cable-MU-LFU1		
PN30	Free-Track-Circuit		
PN31	Occupy-Track-Circuit		

و جریان قسمت‌های مختلف مدار اه با استفاده از سنسورهایی که در مدار راه نصب شده اندازه‌گیری می‌شود، سپس امپدانس کابل‌ها و ریل در سیمولینک متلب محاسبه شده و نهایتاً داده‌های مورد نیاز شامل ولتاژ و جریان قسمت‌های مختلف

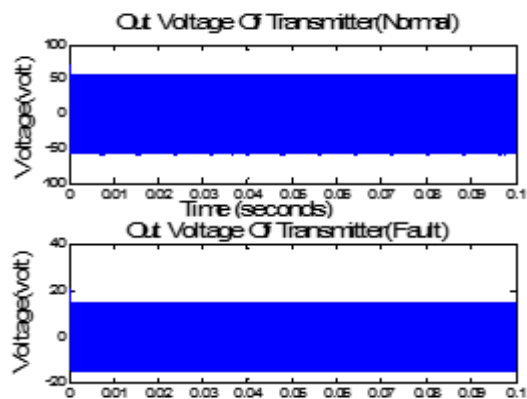
نهایتاً دوباره به بررسی مجدد مدار راه و پیدا کردن عیوب احتمالی می‌پردازد.

برای اجرای شبکه پتریمدل‌سازی شده و تشخیص و ایزولاسیون عیب به یک سری داده‌های ورودی نیاز است. ولتاژ

هم‌زمان است. به‌طور کلی در صورت سالم بودن مدار راه، هیچ گذار معیوبی شلیک نشده و شبکه وارد هیچ یک از حالت‌های معیوب نمی‌شود، اما در صورتی که عیب یا عیوبی در سیستم رخ دهد، با شلیک یک یا چند گذار معیوب، شبکه وارد مکان‌های معیوب می‌شود. به عنوان مثال در صورتی که عیبی در منبع تغذیه و کابل بین واحد تطبیق و واحد تنظیم مربوط به فرستنده در مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز رخ دهد و این مدار راه در حالت آزاد باشد خروجی‌های مربوط به منبع تغذیه، فرستنده، دمدولاتورهای اول و دوم گیرنده و خروجی نهایی گیرنده به ترتیب به شکل ۱۲، شکل ۱۳، شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ است.



شکل ۱۲. خروجی منبع تغذیه مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز



مدار راه و همچنین مقاومت کابل‌ها و امپدانس ریل وارد شبکه پتری می‌شود.

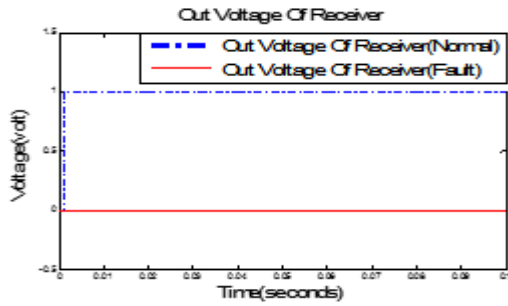
همان‌طور که قبلاً گفته شد در این مقاله از داده‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی شده‌ی مدار راه TI21-M در سیمولینک متلب استفاده می‌شود. شبکه پتریمدل‌سازی شده یک سری خروجی نیز دارد که وضعیت اشغال یا آزاد بودن مدار راه، وضعیت سالم یا معیوب بودن مدار راه و همچنین در صورت بروز عیب نوع عیوب و کد عیوب را نشان می‌دهند. خروجی اول که وضعیت اشغال یا آزاد بودن مدار راه را نشان می‌دهد، میتواند ۴ حالت داشته باشد. این ۴ حالت عبارتند از:

- مدار راه آزاد است؛
- مدار راه اشغال است؛
- مدار راه آزاد است ولی اشغال اعلام شده است؛
- مدار راه اشغال است ولی آزاد اعلام شده است؛

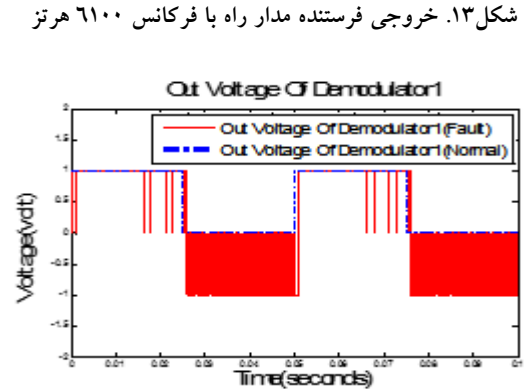
دو حالت آخر به علت وجود عیوب مختلف ممکن است رخ دهد.

۷. اجرای شبکه‌ی پتری

برای اجرای یک شبکه پتریکافی است زمان مدل‌سازی تنظیم و گزینه‌ی اجرا از قسمت سیمولیشن انتخاب شود. شبکه از حالت‌های اولیه شروع به کار می‌کند و تمامی مکان‌های اولیه فعال می‌شوند. برای شلیک شدن هر گذار باید رویدادی رخ دهد و یا تغییری در سیستم ایجاد شود، بدین جهت هر گذار با استفاده از شرایط تعریف شده برای آن و با توجه به ورودی‌های شبکه پتریو تغییراتی که در ورودی‌ها ایجاد می‌شود، می‌تواند فعال و سپس شلیک شود که باعث انتقال مدل از حالتی به حالت دیگر می‌شود. یکی از مزیت‌های مدل‌سازی با شبکه‌های پتری، امکان مدل‌سازی و اجرای هر تعداد مدار راه به‌طور

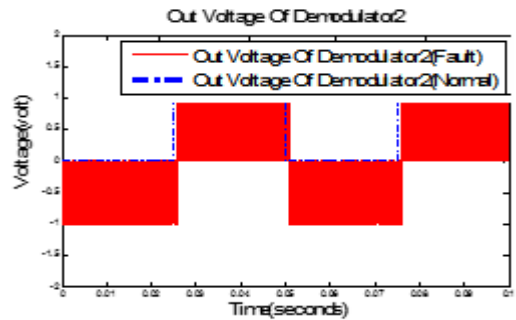


شکل ۱۶. خروجی نهایی گیرنده مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز

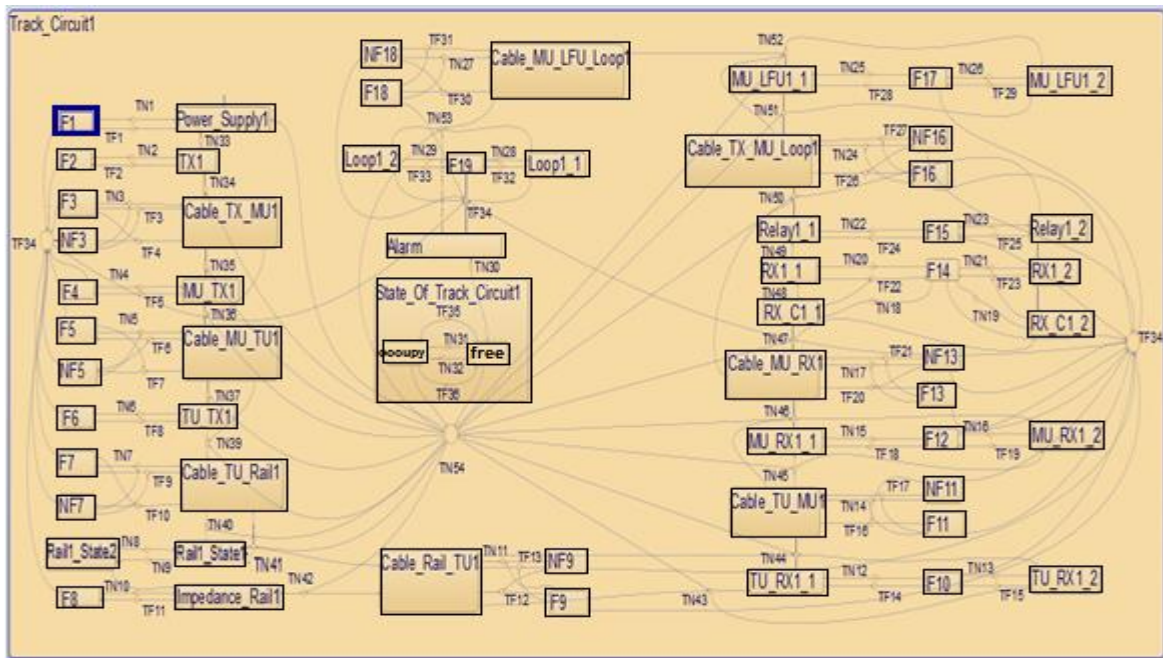


شکل ۱۴. خروجی دمدولاتور اول مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز

مدل شبکه پترياحاصل نیز طی مراحل مختلف رخ دادن عیوب به صورت شکل ۱۷، شکل ۱۸ و شکل ۱۹ خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل ۱۷ وجود عیب با کد F1، شکل ۱۸ وجود عیب با کد F5 و شکل ۱۹ حالت اشغال بودن مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. این بدین معنا است که که منبع تغذیه و کابل بین واحد تطبیق و واحد تنظیم مربوط به فرستنده در حالت معیوب قرار دارند، هم‌چنین مدار راه در حالت آزاد است ولی به علت وجود عیب اشغال اعلام شده است.

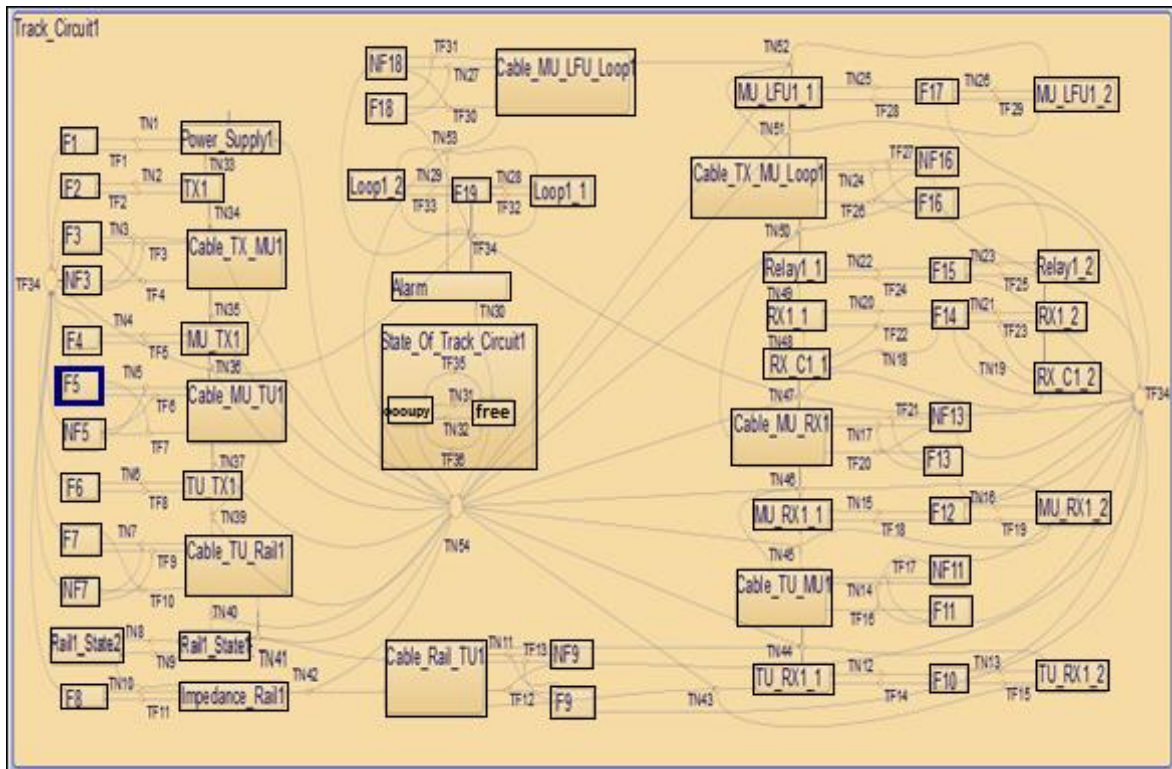


شکل ۱۵. خروجی دمدولاتور دوم مدار راه با فرکانس ۶۱۰۰ هرتز

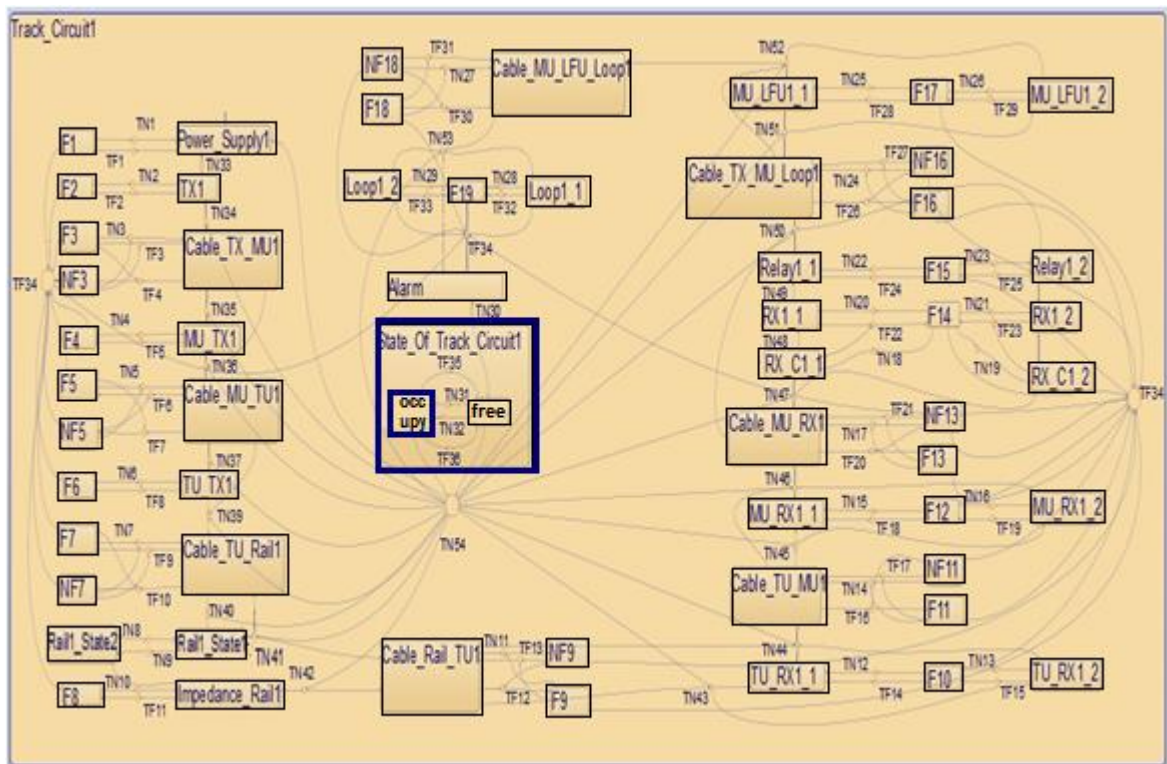


شکل ۱۷. وجود عیب با کد F1

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M با استفاده از شبکه‌های پتری



شکل ۱۸. وجود عیب با کد F5



شکل ۱۹. تراک آزاد است ولی اشغال اعلام شده است

$$M_5 = [0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_5(2) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری هفتم (بررسی کابل):

$$M_6 = [0,0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_6(3) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری هشتم (بررسی واحد تطبیق):

$$M_7 = [0,0,0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_7(4) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری نهم (بررسی کابل):

$$M_8 = [0,0,0,0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_8(5) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری دهم (عیب F5):

$$M_9 =$$

$$[0,0, \dots, 0,1,0,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_9(37) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری یازدهم (هشدار عیب):

$$M_{10} = [0,0, \dots, 0,1]_{59 \times 1}; M_{10}(59) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری دوازدهم (تشخیص وضعیت مدار

راه):

$$M_{11} = [0,0, \dots, 0,1,0,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_{11}(30) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری سیزدهم (اشغال بودن مدار راه):

$$M_{12} = [0,0, \dots, 0,1,0,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_{12}(31) = 1$$

قسمت‌ها که با N نشان داده شده است در حالت نرمال هستند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل و تست عملکردی شبکه، یک مجموعه داده شامل حالت‌های سالم و معیوب به شبکه پترياعمال می‌شود. این مجموعه شامل ۲۰۰ حالت مختلف می‌باشد. هر حالت معیوب خود دربرگیرنده‌ی عیوب مختلف است. شبکه پترياز بین این مجموعه داده‌ی ۲۰۰ تایی، در ۱۸۴ مورد عیوب را به درستی تشخیص داده است و ۱۶ مورد نادرست تشخیص داده است. شبکه پتريدر مواردی عیوب را اشتباه تشخیص داده است که تعداد و شدت عیوب زیاد بوده است. در نتیجه سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب با استفاده از شبکه‌های پتري ۹۲ درصد وضعیت مدار راه و عیوب به وقوع پیوسته را درست تشخیص می‌دهد.

با توجه به فرمول ۴ می‌توان حالت‌های نشان‌دار مربوط به رخ دادن عیوب F1، F2 و اشغال بودن مدار راه را با فرکانس ۶۱۰۰ را توسط بردار نشانه‌گذاری M_k نشان داد. بخشی از حالت‌های نشان‌دار در طول این عیب‌یابی به صورت زیر است:

- بردار نشانه‌گذاری اول:

$$M_0 = [1,0,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_0(1) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری دوم (عیب F1):

$$M_1 =$$

$$[0,0, \dots, 0,1,0,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_1(32) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری سوم (هشدار عیب):

$$M_2 = [0,0, \dots, 0,1]_{59 \times 1}; M_2(59) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری چهارم (تشخیص وضعیت مدار

راه):

$$M_3 = [0,0, \dots, 0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_3(30) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری پنجم (اشغال بودن مدار راه):

$$M_4 = [0,0, \dots, 0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_4(31) = 1$$

- بردار نشانه‌گذاری ششم (بررسی فرستنده):

- بردار نشانه‌گذاری چهاردهم (بررسی واحد تنظیم

مربوط به فرستنده):

$$M_{13} = [0,0,1,0, \dots, 0]_{59 \times 1}; M_{13}(3) = 1$$

• ...

خروجی شبکه پتري نیز وضعیت اشغال یا آزاد بودن تراک، هم‌چنین کد مربوط به عیوب مدار راه را نشان می‌دهد که در شکل ۲۰ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدار راه آزاد است ولی به علت وجود عیوب اشغال اعلام شده است. عیوب مدار راه شامل نقص در منبع تغذیه و افزایش بیش از حد مقاومت کابل بین واحد تطبیق و واحد تنظیم مربوط به فرستنده است که با کد F1 و F5 نشان داده شده است. دیگر

۸ نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا مدار راه فرکانس صوتی به عنوان رایج‌ترین نوع مدار راه مورد بررسی قرار گرفت و مدار راه TI21-M که یک نوع مدار راه فرکانس صوتی است به عنوان مدار راه مورد عیب‌یابی در این مقاله تشریح شد. از آنجا که دسترسی به داده‌های حاصل از یک مدار راه TI21-M امکان‌پذیر نبوده و هزینه‌ی زیادی دربر خواهد داشت، در این مقاله مدار راه TI21-M در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده و از داده‌های حاصل از آن برای تست و آزمایش سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب، استفاده شده است. در میان روش‌های مختلف عیب‌یابی، شبکه‌های پتری به علت جامع بودن نسبت به روش‌های دیگر، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و برای تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه TI21-M به کار گرفته شد. نهایتاً عیوب و خرابی‌های متداول مدار راه‌ها که عمدتاً شامل خرابی اجزای مختلف مدار راه و قطع‌شدگی کابل‌های رابط بین اجزاء مختلف می‌باشد، معرفی گردید و سپس با تولید یک مدل پتری به تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه TI21-M پرداخته شد. در این مدل اجزای مختلف مدار راه از نظر ولتاژ، جریان و امپدانس بررسی شده و عیوب مختلف شناسایی و آشکارسازی می‌شوند. مدل ارائه شده ۲۰۰ بار، تحت شرایط و عیوب مختلف مورد تست و آزمایش قرار گرفت. این سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب ۹۲ درصد وضعیت مدار راه و عیوب به وقوع پیوسته را درست تشخیص می‌دهد.

استفاده از شبکه‌های پتری برای عیب‌یابی مدار راه روشی است که تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است. روش ارائه شده، از نظر تشخیص محدوده‌ی وسیعی از خرابی‌ها و خطاها روش جامعی است که تعداد زیادی از عیوب مدار راه را شناسایی می‌کند و علاوه بر تشخیص عیب، نوع عیوب و مکان آنها را نیز مشخص می‌کند. این روش قابلیت تشخیص عیوب

چند مدار راه را به طور هم‌زمان و به صورت به‌موقع و بلادرنگ دارا است و از آنجا که دارای نمایش گرافیکی است، روشی ساده و قابل فهم محسوب می‌شود. با توجه به تست‌های انجام شده دقت روش نیز قابل قبول است. این روش در مقایسه با روش‌هایی مثل شبکه‌های عصبی و منطق فازی به علت نفوذ در لایه‌های فیزیکی سیستم از سرعت و دقت بیشتری برخوردار است، به‌طوری‌که شبکه‌های عصبی-فازی با دقت ۸۰ درصد و شبکه‌های پتری با دقت ۹۲ درصد عیوب سیستم را تشخیص می‌دهند. از طرف دیگر شبکه‌های پتری به علت نمایش گرافیکی از مدل سیستم در مقایسه با شبکه‌های عصبی-فازی شفاف و ملموس بوده و به اپراتور امکان تجزیه و تحلیل عیوب سیستم، تجزیه و تحلیل علل رخ دادن عیوب و تاثیر آن‌ها روی سیستم را می‌دهد.

نهایتاً مزایای استفاده از شبکه‌های پتری در عیب‌یابی نسبت به روش‌هایی که تاکنون ارائه شده است را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

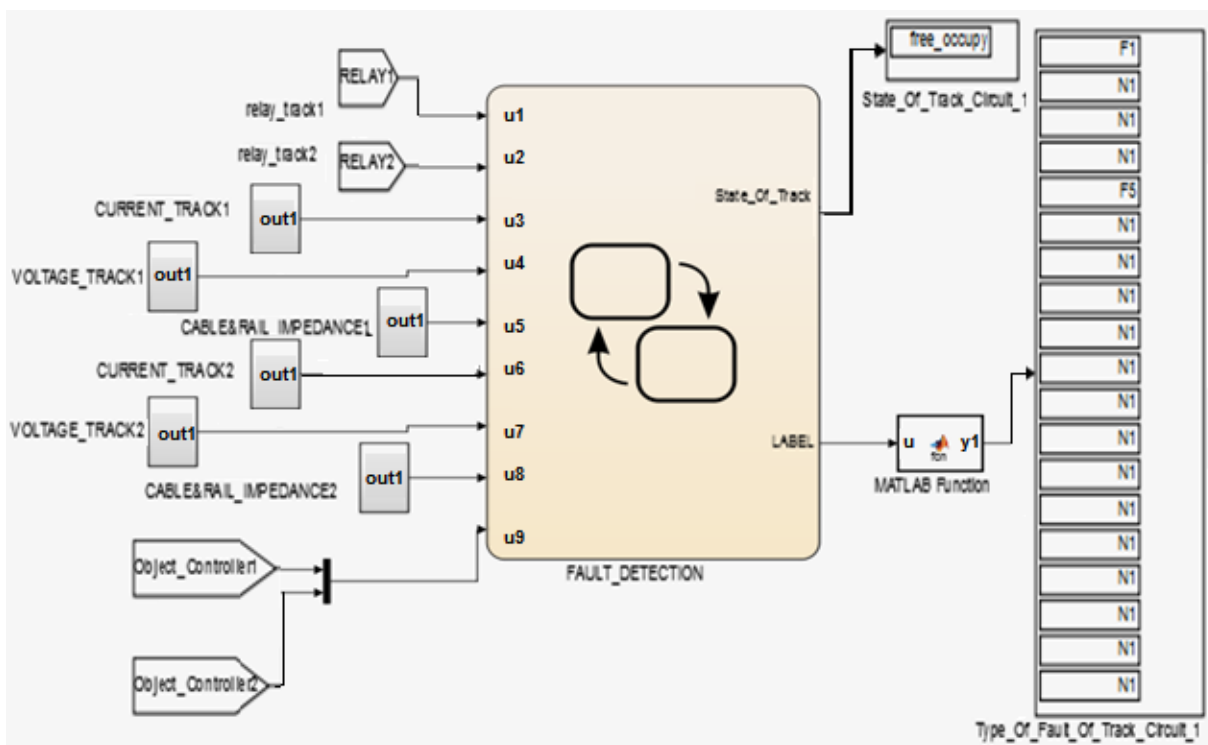
- توانایی مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده، بدون نیاز به مدل ریاضی سیستم و همچنین محاسبات سنگین و طولانی.
- تشخیص عیوب بیشتر به علت دانش‌محور بودن روش و همچنین نفوذ در لایه‌های فیزیکی سیستم با استفاده از مدل‌سازی سلسله‌مراتبی.
- تشخیص برخی عیوب سیستم به صورت هم‌زمان و همچنین توانایی تشخیص عیوب چند مدار راه به صورت هم‌زمان به علت خاصیت شبکه‌های پتری در مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌هایی با ماهیت هم‌زمان و موازی.
- تشخیص و ایزولاسیون عیوب مدار راه، به موقع و به صورت آنلاین با توجه به خاصیت زمان‌دار بودن شبکه‌های پتری.
- قابل فهم بودن و ارائه‌ی تجسم ساده‌ای از سیستم

شده با استفاده از شبکه‌های پتری.

- مناسب برای مدل‌سازی و عیب‌یابی سیستم‌های دارای عدم قطعیت.
- قدرت فوق‌العاده‌ی تصمیم‌گیری در این روش به علت حل شدن مشکل دسترس‌پذیری در شبکه‌های پتری.

و عیوب مربوط به آن با مدل‌سازی سیستم به صورت گرافیکی.

- دارا بودن شبکه‌های پتری از زیرساخت‌های ریاضیاتی قوی و مستدل.
- ارائه‌ی اطلاعات ارزشمند به اپراتورهای سیستم به منظور شناسایی علت اصلی ناهنجاری‌ها و عیوب سیستم.
- انعطاف‌پذیری و قابلیت تعمیم سیستم مدل‌سازی



شکل ۲۰. خروجی شبکه پتری

- railway device using semi-supervised independent factor analysis with mixing constraints”, *Pattern Analysis and Applications*, Vol.15, No.3, pp.313–326. (DOI:10.1007/s10044-011-0212-3)
- Durmus, M. S. (2014) "Control and fault diagnosis of railway signaling systems: a discrete event systems approach”, *Doctoral Dissertation, Graduate School of Engineering, Osaka University*
- Hokmabad, R. R., Badamchizadeh, M. A. and Khanmohammadi, S. (2012) " Fault diagnosis of discrete Event Systems Using Hybrid Petri Nets”, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, Vol.4, No.2, pp.288–292. (DOI:10.7763/IJCTE.2012.V4.468)
- Lefebvre, D. and Leclercq, E. (2011) "Stochastic Petri net identification for the fault detection and isolation of discrete event systems”, *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—PART A: Systems And Humans*, Vol.41, No.2, pp.213–225. (DOI:10.1109/TSMCA.2010.2058102)
- Lin-Hai, Z., Jian-Ping, W. and Yi-Kui, R. (2012) "Fault diagnosis for track circuit using AOK-TFRs and AGA”, *Control Engineering Practice*, Vol.20, No.12, pp.1270–1280. (DOI:10.1016/j.conengprac.2012.07.002)
- Liu, J., Zhou, Z. and Wang, Z. (2018) "Online fault diagnosis in discrete event systems with Partially Observed Petri Nets”, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol.16, No.1, pp.1–8. (DOI:10.1007/s12555-016-0168-6)
- Aravindh, P., Devakumaran, R., Gobikannan, S. and K, R. K. (2017) "Railway Track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol.6, No.3, pp. 100–104.
- Bhushan, M., Sujay, S., Tushar, B. and Chitra, P. (2017) "Automated vehicle for railway track fault detection”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.263, pp.1–5. (DOI:10.1088/1757-899X/263/5/052045)
- Bombardier Transportation (2008) "Audio Frequency track circuit style TI21-M”, *Technical Manual*.
- Bruin, T. de, Kim Verbert, and BabuSka, R. (2016) "Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks”, *IEEE Transaction On Neural Networks And Learning Systems*, Vol.28, No.3, pp.337–353. (DOI:10.1201/9781420049176)
- Cao, Y. and Sun, F. (2018) "Track circuit fault diagnosis method based on least squares support vector”, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol.108, pp.1–8. (DOI:10.1088/1755-1315/108/5/052106)
- Chen, J., Roberts, C., and Weston, P. (2008) "Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems”, *Control Engineering Practice*, Vol.16, No.5, pp.585–596. (DOI:10.1016/j.conengprac.2007.06.007)
- Côme, E., Oukhellou, L., Denœux, T., and Aknin, P. (2012) "Fault diagnosis of a

- Systems (ITSC), pp.2713–2717. China: 8-11 October 2014.
- Spunei, E., Piroi, I., Chioncel, C. P. and Piroi, F. (2018) "Track circuits diagnosis for railway lines equipped with an automatic block signalling system", International Conference on Applied Sciences .IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.294, pp.1–8. (DOI:10.1088/1757-899X/294/1/012014)
- Sun, J., Qin, S., Song, Y. and Member, S. (2004) "Fault diagnosis of electric Power systems based on fuzzy Petri nets", IEEE Transaction On Power Systems, Vol.19, No.4, pp. 2053–2059. (DOI:10.1109/TPWRS.2004.836256)
- Teng, L., Mingli, W., Fan, H. and Kejian, S. (2013) "Finite element calculation of leakage resistance and distributed capacitance of rail to earth in ballastless track", International Conference on Power Systems Transients, pp.1–6. China: 18-20 July.
- Welankiwar, A., Sherekar, S. P., Bhagat, A. and Khodke, P. (2018) "Fault detection in railway tracks using artificial neural networks", International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE), pp.1–5. (DOI:10.1109/RICE.2018.8509083)
- Xiao-long, Q. and Ran, L. (2007) "Fault diagnosis of transmission network using fuzzy petri nets", Conference IEEE Lausanne Power Tech, pp.1802–1806. (DOI:10.1109/PCT.2007.4538590)
- Zhu, G., Wang, Y. and Wang, Y. (2019) "Model identification of unobservable behavior of discrete event systems using petri nets", Journal of Control Science and Engineering, pp.1–11. (DOI:10.1155/2019/2895685)
- Oukhellou, L., Debiolles, A., Denux, T., and Aknin, P. (2010) "Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster-Shafer classifier fusion", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.23, No.1, pp.117–128. (DOI:10.1016/j.engappai.2009.06.005)
- Pamuk, N., and UYAROGLU, Y. (2012) "The fault diagnosis for power system using fuzzy petri nets", Przegląd Elektrotechniczny(Electrical Review), Vol.88, No.7, pp.99–102.
- Patra, A. P. and Kumar, U. (2010) "Availability analysis of railway track circuit", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.224, No.3, pp.169–177. (DOI:10.1243/09544097JRRT296)
- Pengrui, L. and Wenchang, L. (2019) "Fault diagnosis method of section track circuit based on support vector machine", China Academy Railway Sciences Corporation Limited Standards and Metrology Research Institute, Vol.1, No.1, pp.1–6.
- Ran, N., Wang, S., Su, H., and Wang, C. (2017) "Fault diagnosis for discrete event systems modeled by bounded petri nets", Asian Journal of Control, Vol.19, No.6, pp.1–10. (DOI:10.1002/asjc.1500)
- Sandidzadeh, M. A., and Dehghani, M. (2013) "Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems", Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol.24, No.4, pp.859–869. (DOI:10.3233/IFS-2012-0604)
- She, X., Zhao, J., Yang, J., and Member, S. (2014) "Functional safety verification on railway signaling System with Colored Petri Nets", IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation

سیستم تشخیص و ایزولاسیون عیب مدار راه TI21-M با استفاده از شبکه‌های پتری

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق، ص. ۱-۱۰.

تهران: ۹-۱۱ آبان ۱۳۹۰.

-میرآبادی، احمد. (۱۳۸۵) "مقدمه ای بر سیستمهای

کنترل و سیگنالینگ"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت

ایران.

-امیدزاده، مهدی و قربانی فرد، مهناز. (۱۳۹۴) "تشخیص

خطای ترانسفورماتورها با استفاده از شبکه‌های

پتری"، کنفرانس ملی فناوری، انرژی و داده با رویکرد

مهندسی برق و کامپیوتر، ص. ۲۶۷۱-۲۶۷۶. کرمانشاه:

۹-۱۰ خرداد ۱۳۹۴.

-ساک، مهدی و لسانی، حمید. (۱۳۹۰) "پایش

اتوماسیون توزیع با استفاده از مدل سازی پتری نت"،

الهه نوری دهنوی، درجه کارشناسی در رشته برق الکترونیک را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه دولتی تفرش و درجه کارشناسی ارشد در رشته کنترل و علائم مهندسی راه آهن را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیگنالینگ راه آهن، الکترونیک و برنامه نویسی اندروید بوده و در حال حاضر دانش آموخته کارشناسی ارشد کنترل و علائم مهندسی راه آهن است.



محمدعلی صندیلزاده، درجه کارشناسی را در رشته مهندسی برق الکترونیک در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی برق کنترل در سال ۱۳۷۲ از همان دانشگاه اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به اخذ درجه دکتری در رشته مهندسی برق کنترل، از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کنترل و سیگنالینگ راه آهن و قطار بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



بهمن قربانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-کنترل را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۶ 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.

