# طراحی شبیه‌ساز سیستم اینترلاکینگ راه‌آهن بر اساس دینامیک رویداد محور در نرم افزار MATLAB

بیژن معاونی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمدعلی صندیدزاده، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمیدرضا کشاورز، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: b_moaveni@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲٤ پذیرش: ۱۳۹٤/۰۳/۲۵

## چکیده

سیستم‌های علائم الکتریکی و اینترلاکینگ نقشی حیاتی در ایجاد یک حمل و نقل ایمن در سیستم‌های راه‌آهن ایفا می‌کنند. از آنجایی که در این سیستم‌ها رخدادن هیچ نوع خطایی حتی کوچک جایز نیست، استفاده از روش‌های صوری برای طراحی، شبیه سازی، مدل‌سازی و ارزیابی، بسیار حائز اهمیت است. چندین روش صوری برای طراحی وجود دارد که یکی از ابزارهای مناسب، استفاده از جعبه ابزار Stateflow نرم‌افزار MATLAB است. در این مقاله یک مدل از سیستم اینترلاکینگ و علائم الکتریکی برای شبکه‌های ریلی بر اساس دینامیک رویداد محور طراحی شده است و با استفاده از اطلاعات پایه شبکه ریلی، قواعد ترافیکی مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شوند. از ویژگی‌های اصلی این شبیه ساز، طراحی و توسعه آسان سیستم اینترلاکینگ تنها با تغییر اطلاعات پایه و افزودن مدهای عملکردی جدید است. هدف از طراحی این مدل توسعه و اجرای توابع اینترلاکینگ جدید در یک محیط شبیه سازی برای بهبود عملکرد آن‌ها است. نوآوری اصلی در این مدل، طراحی المان‌های شبکه ریلی بر اساس دینامیک رویداد محور و قابلیت توسعه و ارتباط سیستم اینترلاکینگ با سایر سیستم‌های کنترل ترافیک ریلی است. در انتها مدل سیستم اینترلاکینگ برای شبکه ریلی خط ۲ متروی تهران و یک ایستگاه راه‌آهن طراحی می‌شود و عملکرد آن در ارتباط با سیستم‌های کنترل ترافیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**واژه های کلیدی:** سیستم‌های گسسته پیشامد، سیستم اینترلاکینگ، سیستم کنترل ترافیک، نرم افزار MATLAB، جعبه ابزار Stateflow

## ۱. مقدمه

سیستم‌های علائم الکتریکی و اینترلاکینگ[1] نقشی حیاتی برای ایجاد یک حمل و نقل ایمن در سیستم‌های راه‌آهن ایفا می‌کنند. مهم‌ترین ویژگی که این سیستم‌ها باید داشته باشند، عدم بروز هرگونه خطا در عملکرد آن‌ها است. سیستم اینترلاکینگ با توجه به درخواست اعزام کننده برای اختصاص یک مسیر به قطار، شرایط لازم را بررسی می‌کند و در صورت مجاز بودن مسیر درخواستی، تمامی المان‌های موجود در مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم و قفل می‌کند و مسیر به قطار اختصاص می‌یابد و از ورود سایر قطارها به مسیر اختصاص داده شده به قطار، جلوگیری می‌شود. تمامی محدودیت‌های ترافیکی و فیزیکی مسیر به سیستم‌های کنترل ترافیک قطار ارسال می‌شود و در تمام طول سفر، بر حرکت ایمن قطارها نظارت می‌شود تا از بروز خطا و حادثه جلوگیری شود. بنابراین، مدل‌سازی، راستی آزمایی و بررسی صحت عملکرد سیستم‌های ابنترلاکینگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و شبیه سازهای مختلفی به منظور بررسی این موارد طراحی و پیشنهاد شده اند [Xiangxian, 2011].

سیستم‌های علائم الکتریکی و اینترلاکینگ بخش‌های مختلفی دارند که شامل مدهای عملکردی با دینامیک رویداد محور هستند. این بخش‌ها باید عملکردی دقیق و بدون بروز خطا داشته باشند. از این‌رو برای مدل‌سازی آن‌ها می‌بایست از روش‌های صوری و گسسته پیشامد[2] استفاده کرد. ابزارهای مختلفی برای مدل‌سازی گسسته پیشامد از سیستم‌های علائم الکتریکی و اینترلاکینگ وجود دارد که یکی از مناسب‌ترین آن‌ها استفاده از ماشین‌های حالت متناهی[3] و جعبه‌ابزار Stateflow نرم‌افزار MATLAB است. ابزار Stateflow در ارتباط با Simulink و سایر جعبه‌ابزارهای MATLAB دارای قابلیت‌های بسیاری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل ترافیک است.

هدف از این مقاله، طراحی و ارائه یک شبیه ساز سیستم علائم الکتریکی و اینترلاکینگ بر اساس دینامیک رویداد محور است. این سیستم با مدل‌سازی المان‌های شبکه ریلی و ایجاد ارتباط بین آن‌ها، تمامی قواعد اینترلاکینگ را اجرا می‌کند. از ویژگی‌های این سیستم ارتباط آسان با سیستم‌های کنترل ترافیک و اجرای استراتژی‌های ترافیکی مختلف با در نظر گرفتن قواعد اینترلاکینگ و مشخصات فیزیکی شبکه ریلی، توسعه و طراحی توابع اینترلاکینگ جدید و بررسی بروز اغتشاش در سیستم اینترلاکینگ است. شبیه ساز پیشنهادی که در این مقاله ارائه می‌گردد، این امکان را در اختیار طراح و بهره بردار قرار می‌دهد که مواردی، از جمله صحت عملکرد و کارآمدی سیستم اینترلاکینگ را بررسی نمایند.

در بخش دوم، مروری خواهیم داشت بر تحقیقاتی که در حوزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های اینترلاکینگ و کنترل ترافیک ریلی انجام شده است. در بخش سوم، المان‌های شبکه ریلی به صورت گسسته پیشامد مدل‌سازی می‌شوند و با استفاده از این المان‌های شبکه ریلی، شبیه‌ساز سیستم اینترلاکینگ به طور کامل در بخش چهارم طراحی و توسعه داده می‌شود. در بخش پنجم، با ارائه چند مثال نحوه عملکرد شبیه‌ساز سیستم اینترلاکینگ در اجرای سناریوهای ترافیکی مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش انتهایی نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده شده است. خوانندگان عزیز، در پیوست این مقاله می توانند معرفی اجمالی از جعبه‌ابزار Stateflow نرم‌افزار MATLAB را مورد مطالعه قرار دهند.

## ۲. مروری بر ادبیات موضوع

سیستم‌های اینترلاکینگ نقش بسیار مهمی در ایجاد یک محیط ایمن در حرکت قطارها دارند و تاکنون روش‌های بسیاری برای مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد صحیح آن‌ها بکار گرفته شده است. یکی از روش‌های مرسوم برای مدل‌سازی سیستم اینترلاکینگ، استفاده از نظریه گراف‌ها است. هانسن توپولوژی هر ایستگاه‌ها را توسط گراف‌ها مدل کرده که هر گره به یک بخش از مسیر و رأس‌ها به ارتباط ترافیکی قطارها اشاره دارد، در این مدل حالت‌های ایمن ایستگاه به عنوان گزاره‌های گراف تعریف می‌شوند و نیازمندی‌های پیاده‌سازی و ایمنی توسط جعبه ابزار VDM[4] ارزیابی شده است [Hansen, 1994] و [Hansen,

1998]. وانگ و همکاران یک رویکرد بر پایه نظریه گراف برای انتخاب و ارزیابی صحت مسیر در شبکه ریلی طراحی کرده‌اند. در این رویکرد از یک مدل مبتنی بر المان‌های ریلی برای ارایه پیکره‌بندی ایستگاه استفاده شده است که با استفاده از یک الگوریتم ماتریسی بر اساس نظریه گراف تمامی مسیرهای یک ایستگاه را بررسی نموده و مسیر مناسب را پیشنهاد می‌کند. از ویژگی‌های این الگوریتم وابسته نبودن به طرح ایستگاه است و در صورت تغییر در طرح ایستگاه، با بروز رسانی اطلاعات پیکره‌بندی ایستگاه توسط طراح، اطلاعات مسیر جدید به صورت اتوماتیک در نظر گرفته می‌شود [Wang, Chen and Huang, 2013].

ژانگژین و یولین یک روش برای طراحی قواعد اینترلاکینگ با هدف افزایش بهره‌وری معرفی کرده‌اند. در این رویکرد قواعد اینترلاکینگ و پیکره‌بندی ایستگاه به صورت جداگانه توصیف می‌شود و با استفاده از ارتباط بین داده‌های این دو بخش، قواعد اینترلاکینگ به صورت اتوماتیک توسط یک نرم‌افزار تولید می‌شود. این رویکرد از یک روش مولفه محور برای توصیف پیکره‌بندی یک ایستگاه استفاده می‌کند. در این مدل هر ایستگاه به عنوان مجموعه‌ای از مولفه‌های متصل به هم توصیف می‌شود و اطلاعات مسیر از داده‌های پیکره‌بندی ایستگاه استنباط می‌شود [Xiangxian and Yulin, 2011].

خان و همکارانش با استفاده از زبان‌های توصیفی چند عامله برای بهبود عملکرد سیستم‌های اینترلاکینگ بلاک متحرک استفاده کرده‌اند. این سیستم‌ها به واسطه ویژگی‌های پیوسته و عدم قطعیت، مثل سرعت و وزن قطار، نیازمند استفاده از رویکردهای چند عامله توزیع شده فازی برای ارایه نایقینی‌ها و عدم قطعیت‌های آن‌ها است. به منظور دست یافتن به یک محیط چند عامله توزیع یافته فازی، زبان صوری Z را با یکپارچه سازی منطق فازی، سیستم‌های چندعامله و زبان Z[5] را به سوی یک زبان توصیف چندعامله فازی[6] (FMASL) توسعه داده شده است. در مدل IMARS[7]، قطار یک عامل هوشمند خودمختار است که دارای زیرعامل‌های فازی، بلاک متحرک و عامل هوشمند تقاطع است [Khan et al. 2011]. مدل IMARS یک تجزیه و تحلیل صوری از ویژگی‌های ایمنی بلاک متحرک ارایه می‌کند که از تصادف و خروج قطارها در المان‌های شبکه ریلی جلوگیری می‌کند. در نسخه جدید IMARS یک رویه گام به گام برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ایمنی سیستم با استفاده از نظریه گراف و زبان Z پیشنهاد شده است. سپس ویژگی‌های ایمنی توسط کنترل کننده‌های رایانه ای تجزیه و تحلیل شده و با استفاده از ابزار Z/Eves تجزیه و تحلیل شده و صحت آن مورد بررسی قرار گرفته است [Zafar et al. 2012]. در دو نسخه قبلی از IMARS، کنترل تقاطع به صورت دو بعدی انجام می‌گیرد و حرکت قطارها در شبکه ریلی وابسته به کنترل المان‌ها و قطارها است. در نسخه جدید با استفاده از شبکه‌های پتری، کنترل به صورت یک بعدی و تنها توسط قطار انجام می‌شود [Khan et al. 2014].

وانیت از شبکه‌های پتری رنگی برای تولید و بررسی صحت جداول کنترل اینترلاکینگ استفاده می‌کند. مدل پیشنهادی متشکل از دو بخش طرح علائم الکتریکی و کنترل اینترلاکینگ است. طرح علائم الکتریکی برای شبیه‌سازی عبور قطارها و بخش کنترل اینترلاکینگ برای اعمال کنترل کننده مطابق با توابع جدول اینترلاکینگ است [Vanit-Anunchai, 2010].

پس از مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های اینترلاکینگ باید صحت عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد که یکی از مناسب‌ترین روش‌ها تبدیل قواعد اینترلاکینگ به توصیف‌های صوری است. هاکستاسن با استفاده از زبان‌های صوری شرایط ایمنی مرسوم در سیستم‌های اینترلاکینگ رله‌ای موجود در کشور دانمارک را استخراج می‌کند و با ابزار SAL[8] مورد بررسی قرار می‌دهد و شرایط ایمنی در موارد برخورد یا خروج از خط تجزیه و تحلیل می‌شود [Haxthausen, 2013]. کانسو و همکاران نیز برای سیستم‌های اینترلاکینگ که بر اساس زبان برنامه‌نویسی نردبانی طراحی شده‌اند، یک مدل بر اساس زبان‌های صوری طراحی کرده‌اند. ترجمه و تبدیل سیستم اینترلاکینگ به زبان صوری به ترتیب زیر انجام می‌شود: ۱. توسعه مدل ریاضیاتی از سیستم اینترلاکینگ و ترجمه از منطق زبان نردبانی به مدل صوری ۲. توسعه بررسی شرایط ایمنی برای تضمین صحت ایمنی شرایط ۳. بررسی شرایط ایمنی

با استفاده از مسئله صدق‌پذیری دودویی ٤. تولید شرایط ایمنی از قواعد علائم الکتریکی با استفاده از مدل توپولوژیکی راه‌آهن [Kanso, Moller and Setzer, 2009]. میرآبادی و یزدی یک مدل برای تولید و بررسی صحت جداول کنترل اینترلاکینگ ارایه کرده‌اند که دارای سه بخش برنامه ریزی گرافیکی علائم الکتریکی، تولید کننده جدول کنترل و درست یابی این جدول است. عمل درس یابی جدول کنترل اینترلاکینگ توسط ابزار چک کننده مدل NuSMV[9] انجام می‌گیرد و محتویات آن را برای شرایط ایمن حرکت قطارها و همچنین برای یافتن هر تنظیم متناقضی در جدول کنترل، تجزیه و تحلیل می‌کند [Mirabadi and Yazdi, 2009]. سیماتی و همکاران نیز با استفاده از روش‌های صوری یک ابزار صنعتی طراحی کرده‌اند که برای بررسی صحت عملکرد سیستم اینترلاکینگ به طور عملی استفاده می‌شود. مدل ارایه شده برای حفظ ویژگی‌های قابل استفاده بودن و مقیاس پذیری[10] طراحی شده است [Cimatti et al. 1998].

تحقیقات دیگری نیز در زمینه سیستم‌های اینترلاکینگ انجام شده است که مرتبط با مسایل تصمیم سازی، مسیرسازی و ... است. لزانو و همکاران یک مدل تصمیم ساز (مستقل از پیکره‌بندی ایستگاه) بر پایه استفاده از چند جمله‌ای‌های ایده‌آل و بر پایه گروبنر طراحی کرده‌اند که می‌تواند برای بررسی اختصاص یک بخش از شبکه ریلی به قطار، مورد استفاده قرار گیرد. [Roanes-Lozano et al. 2000]. یکی از ابزارهای شبیه‌سازی برای سیستم اینترلاکینگ، نرم‌افزار OpenTrack است که یک ابزار مناسب برای تجزیه و تحلیل تاثیر افزودن زیرساختهای جدید به شبکه ریلی، تولید برنامه زمانی، بکارگیری سیستمهای سیگنالینگ متفاوت و رخ دادن خطا در شبکه ریلی است. OpenTrack بر اساس یک مدل ماکروسکوپی طراحی شده است که عملکرد سیستمهای ریلی را بر اساس اطلاعات پایه تعریف شده از قطارها، زیرساخت‌ها و جدول زمانی شبیه‌سازی می‌کند. این نرم‌افزار شبیه‌ساز از ترکیب فرآیند شبیه‌سازی گسسته–پیوسته و برنامه نویسی شیء گرا استفاده می‌کند. هدف از OpenTrack ایجاد یک بستر ماکروسکوپی برای شبیه‌سازی راه‌آهن است [Nash and Huerlimann, 2004].

با توجه به مقالاتی که در این بخش به آنها اشاره شد، وجود یک شبیه ساز که امکان شبیه سازی سیستم اینترلاکینگ را فراهم نموده، همچنین قابلیت گسترش و نیز تغییرات مورد نظر پژوهشگران و مهندسان فعال در حوزه کنترل اتوماتیک ترافیک را داشته باشد لازم به نظر می‌رسد. از این‌رو، در این مقاله هدف طراحی و ارائه یک شبیه ساز سیستم علائم الکتریکی و اینترلاکینگ بر اساس دینامیک رویداد محور در نرم افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار stateflow است.

## ۳. مدل‌سازی بر اساس دینامیک رویداد محور

سیستم‌اینترلاکینگ شامل بخش‌های مختلفی است که عملکرد آن‌ها و عمل انتقال حالت به صورت رخ دادن یک رویداد انجام می‌گیرد. به عنوان مثال تغییر وضعیت سوزن یا سیگنال، اشغال یا خالی شدن یک بخش از مسیر، اختصاص مسیر به قطار همگی می‌توانند به عنوان حالت‌هایی در نظر گرفته شوند که با رخ دادن یک رویداد تغییر وضعیت می‌دهند. در این بخش با توجه به ویژگی بیان شده، ساختار هر یک از اجزاء سیستم اینترلاکنیگ بیان شده و به صورت رویداد محور در محیط Stateflow طراحی می‌شود.

### ۳–۱ مدل‌سازی بلاک

بلاک‌ها در خطوط ریلی دارای دو حالت اشغال و آزاد هستند که یکی نشان دهنده حضور و دیگری عدم حضور قطار در بلاک است. ساختار بلاک به‌این صورت است که در هر زمان فقط می‌تواند در یکی از این دو حالت قرار بگیرد از این رو حالت‌ها به صورت OR انحصاری ساخته می‌شوند. برای مدل‌سازی هر یک از بلاک‌ها فرض می‌شود که رخ دادن یک پیشامد از حضور یا عدم حضور قطار در بلاک موجب تغییر حالت در بلاک می‌شود و یک انتقال حالت انجام می‌شود. یعنی اگر بلاک در وضعیت عدم حضور قطار باشد و یک پیشامد حضور قطار به واسطه سیستم مدار راه تولید شود، یک انتقال حالت انجام گرفته و حالت حضور قطار در بلاک فعال می‌شود.

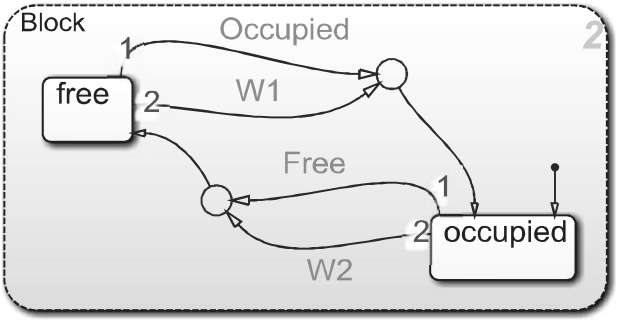
در شکل ۱ مدل رویداد محور بلاک نشان داده شده است. به دلیل

اینکه هر بلاک به صورت همزمان با سایر اجزاء سیستم ترافیکی عمل می‌کند، آن را به‌صورت یک حالت موازی طراحی می‌کنیم که شامل دو زیر حالت حضور و عدم حضور قطار است. انتقال حالت در صورت رخ دادن یک پیشامد خالی (Free) یا اشغال بودن (Occupied) از طریق سیستم مدار راه انجام می‌شود. در مسایل شبیه‌سازی یک پیشامد ناخواسته (W1,W2) مثل خراب شدن سیستم مدار راه و تشخیص اشتباه از حضور قطار در بلاک، نیز به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود که در صورت رخ‌دادن، منجر به انتقال حالت می‌شود.

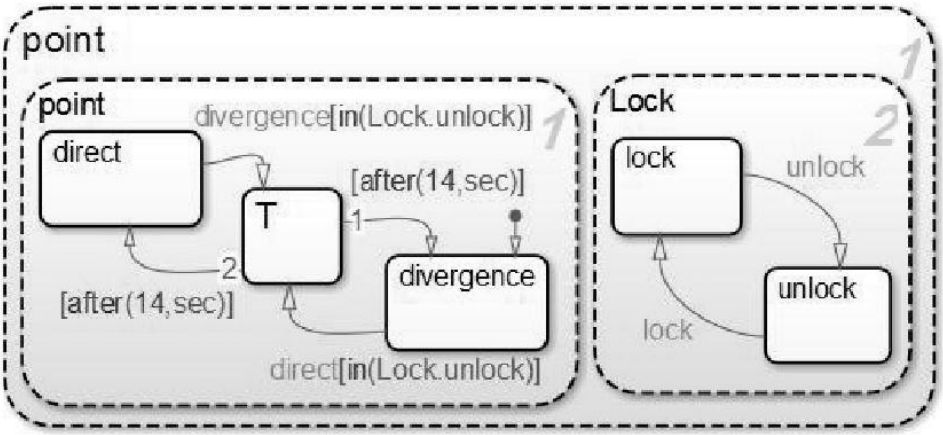
سایر اجزاء سیستم‌های اینترلاکینک و کنترل ترافیک که عملکرد آنها مرتبط با وضعیت بلاک‌ها است، با مشاهده وضعیت حالت بلاک، انتقال حالت ایجاد می‌کنند. یعنی اگر یک بلاک توسط قطار اشغال شود ممکن است منجر به تولید پیشامدهای خاصی شود که سبب انتقال حالت در وضعیت سیگنال، حرکت قطار، سیستم اینترلاکینگ و ... شود.

### ۳-۲ مدل‌سازی سوزن

سوزن‌ها نیز دارای دو حالت عملکردی هستند که با توجه به دستورات دریافتی از سیستم اینترلاکینگ در یکی از این حالت‌ها تنظیم می‌شوند. سوزن‌های معمول در حالت کلی دارای دو وضعیت تنظیم مستقیم (نرمال) و معکوس هستند. حالت‌های دیگری نیز می‌توان برای یک سوزن تعریف نمود، چون انتقال حالت در یک سوزن به صورت فوری انجام نمی‌گیرد، می‌توان یک حالت انتقالی همراه با تاخیر زمانی در نظر گرفت که فرآیند تغییر وضعیت سوزن را مدل کند. حالت دیگری که برای سوزن‌ها باید در نظر گرفت حالت قفل شدن سوزن است که دارای دو زیر حالت قفل و باز است. وظیفه این حالت جلوگیری از تغییر وضعیت سوزن در هنگامی است که مسیر به قطار خاصی اختصاص داده شده است و تا زمانی که تمامی شرایط ایمنی بر قرار نشود سوزن را در حالت قفل باقی نگه می‌دارد. مدل طراحی شده برای سوزن در شکل ۲ نمایش داده شده است.




**شکل ۱. مدل رویداد محور بلاک**




**شکل ۲. مدل رویداد محور سوزن**

همان‌گونه که درشکل ۲ مشخص است، سوزن تنها در صورتی می‌تواند تغییر وضعیت بدهد که سوزن در حالت عدم قفل[۲۱] باشد. به عبارت دیگر اگر یک سوزن قفل باشد، قادر به تغییر وضعیت آن نخواهیم بود. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد و در شکل ۲ نیز دیده می شود، زمان معمول برای تغییر حالت سوزن ١٤ ثانیه در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳ مدل‌سازی سیگنال

سیگنال‌ها می‌توانند دارای دو، سه یا چهار حالت عملکردی باشند که با توجه به وضعیت اشغال بلاک و سوزن در یکی از این حالت ها قرار می‌گیرند. مدل سازی سیگنال در این مقاله بر اساس سیگنال‌های سه نمایی انجام شده است. طراحی سیگنال چهار نمایی نیز همانند سیگنال سه نمایی بوده و به سادگی قابل توسعه و پیاده سازی است. سیگنال سه نمایی از ۳ زیر حالت با ساختار اختصاری به نام‌های قرمز، سبز و زرد تشکیل می‌شود که نشان دهنده رنگ آن است. وضعیت سیگنال با توجه به اشغال بودن خط و وضعیت سوزن تنظیم می‌شود. اگر قطار وارد بلاک شود سیگنال نمای قرمز را نمایش می‌دهد و اگر بلاک خالی باشد سیگنال نمای سبز را نمایش می‌دهد. در خطوط مترو اگر سوزن در حالت مستقیم تنظیم باشد سیگنال نمای سبز و اگر سوزن در حالت معکوس تنظیم شود سیگنال نمای زرد را نمایش می‌دهد.

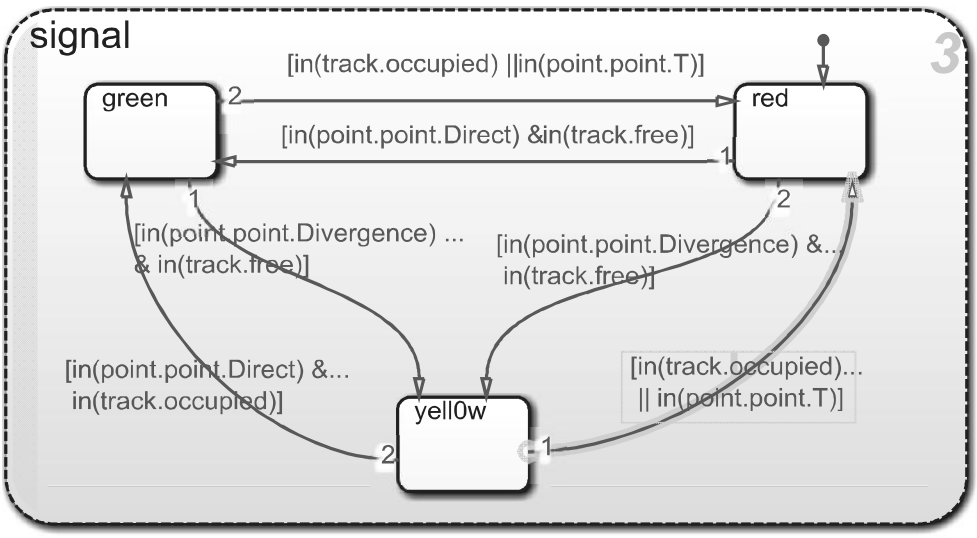
مدل رویداد محور سیگنال ۳ نمایی در شکل ۳ نمایش داده شده است. سیگنال قرمز به طور پیش‌فرض در ابتدا نمایش داده می‌شود.

در جدول ۱ قواعد و شرایط تغییر وضعیت سیگنال با توجه به وضعیت سوزن و بلاک بیان شده است. سیگنال در هر حالتی که قرار داشته باشد می‌تواند به دو حالت دیگر انتقال یابد.

### ٤-۳ ارتباط بین المان‌های شبکه ریلی در Stateflow

هر یک از المان‌های مدل‌سازی شده در بخش‌های قبلی به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند. مثلا رنگ یک سیگنال مستقیما به وضعیت اشغال بلاک متناظر خود یا به وضعیت سوزن بستگی دارد. برای عملکرد همزمان، تمامی المان‌ها با ساختار موازی طراحی شده‌اند. ساختار کلی یک مدل متشکل از یک سوزن، سیگنال و بلاک در شکل ٤ نمایش داده شده است. عملکرد این مدل بدین صورت است که هر تغییری در وضعیت سوزن و اشغال شدن بلاک، رنگ سیگنال را متناسب با تغییرات رخ داده عوض می‌کند. به طور کلی قواعد اجرا شده در این مدل عبارتند از:

– یک سوزن تنها در صورتی که قفل سوزن فعال نباشد و بلاک




شکل ۳. مدل رویداد محور سیگنال

**جدول ۱. قواعد تغییر وضعیت سیگنال**

| نمای فعلی | نمای بعدی | انتقال حالت‌ها در المان‌های شبکه ریلی |
|---|---|---|
| «قرمز» | زرد | سوزن در جهت معکوس (وضعیت نرمال) (point.point.Divergence) و بلاک خالی(track.free) |
| | سبز | سوزن در جهت مستقیم (وضعیت نرمال) (point.point.Direct) و بلاک خالی(track.free) |
| «سبز» | قرمز | سوزن در حال تغییر وضعیت (point.point.T)یا بلاک اشغال(track.occupied) |
| | زرد | سوزن در جهت معکوس(point.point.Divergence) و بلاک خالی(track.free) |
| «زرد» | سبز | سوزن در جهت مستقیم (وضعیت نرمال)(point.point.Direct) و بلاک خالی(track.free) |
| | قرمز | سوزن در حال تغییر وضعیت (point.point.T)یا بلاک اشغال(track.occupied) |

سوزن خالی باشد قادر به تغییر وضعیت است.

– اگر یک بلاک اشغال شده باشد سیگنال قرمز می‌شود.

– اگر بلاک خالی باشد و سوزن در مسیر مستقیم تنظیم شود سیگنال سبز نمایش داده می‌شود.

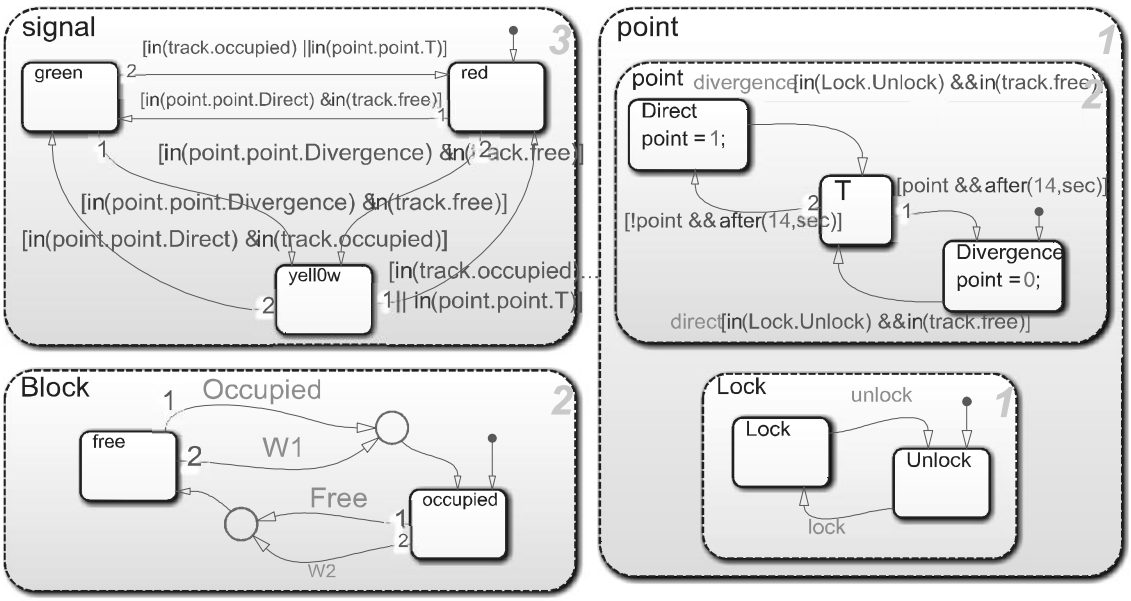
– اگر بلاک خالی باشد و سوزن در وضعیت معکوس تنظیم شود سیگنال زرد نمایش داده می‌شود.

– در مدت زمان تغییر وضعیت سوزن (به مدت ۱٤ ثانیه) سیگنال قرمز نمایش داده می‌شود.

– پیشامدهای ناخواسته W1 و W2 می‌توانند وضعیت اشغال یک بلاک را تغییر دهند.

## ٤. شبیه‌ساز سیستم اینترلاکینگ

پس از مدل‌سازی المان‌های شبکه ریلی، شبیه‌ساز سیستم اینترلاکینگ طراحی می‌گردد که وظیفه مدیریت و کنترل این المان‌ها را بر اساس درخواست‌های کاربران و شرایط ترافیکی بر عهده دارد. سیستم اینترلاکینگ اجرا کننده قواعد ترافیکی و ایمنی در مدل ترافیکی است. این سیستم با دریافت داده‌های شبیه‌سازی تولید شده توسط رابط گرافیکی، از آن‌ها در اجرای قواعد اینترلاکینگ استفاده می‌کند. قواعد اینترلاکینگ شامل مسیرسازی، اختصاص مسیر به قطار و تنظیمات المان‌های شبکه ریلی است. این سیستم بر اساس دینامیک رویداد محور عمل




**شکل ٤. مدل‌سازی اینترلاکینگ برای یک سوزن، بلاک و سیگنال به صورت OR انحصاری**

می‌کند، به این معنی که انتقال حالت تنها در صورت رخ دادن یک پیشامد صورت می‌گیرد، پیشامد می‌تواند ورود یا خروج یک قطار از ایستگاه و یا تشخیص مسدود بودن مسیر در جلوی قطار باشد که سیستم اینترلاکینگ با توجه به اطلاعات پایه، اعمال مناسب در پاسخ به این پیشامد را انجام می‌دهد. در شکل ۵ یک دیاگرام بلوکی ارائه گشته که در آن عملکرد سیستم اینترلاکینگ نمایش داده شده است.

سیستم اینترلاکینگ طراحی شده در شکل ٦ نمایش داده شده است. این سیستم دارای ۳ بخش اصلی است که عبارتند از:

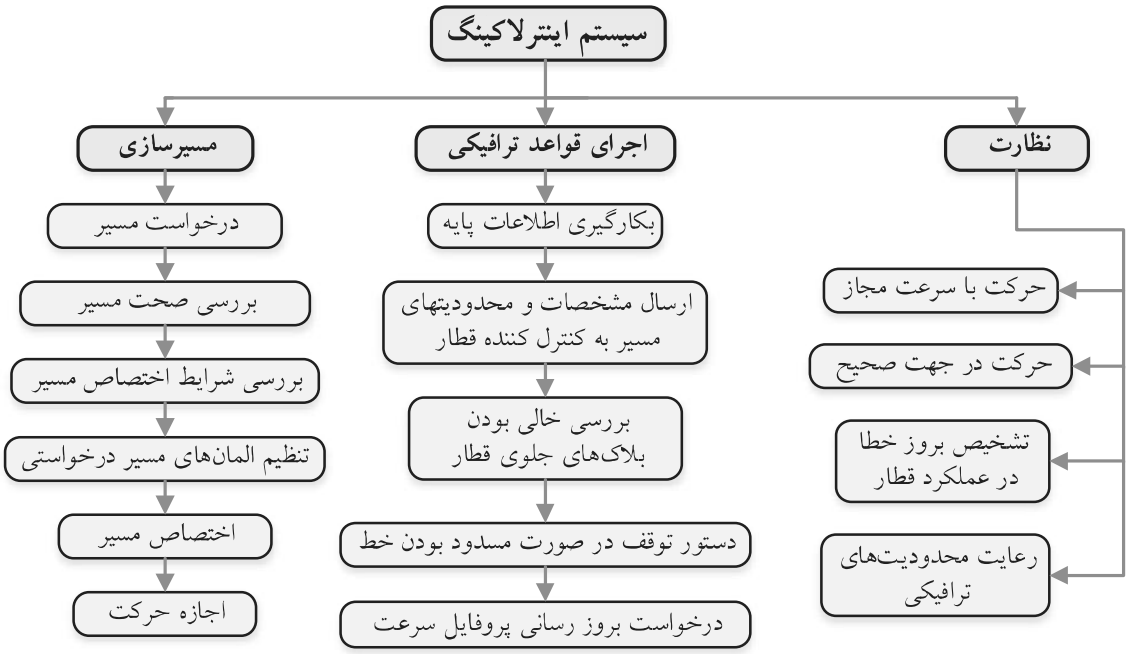
– مسیرسازی: این بخش که با نام مسیرسازی مشخص شده، در صورت درخواست اعزام کننده برای اختصاص یک مسیر جدید به قطار فعال می‌شود و با دریافت اطلاعات از وضعیت بلاک‌ها (زیرحالت بلاک) و وضعیت سوزن‌ها (زیرحالت سوزن)، بر اساس قواعد ترافیکی و اینترلاکینگ، شرایط اختصاص مسیر را بررسی کرده و المان‌های مرتبط با مسیر درخواستی را در وضعیت صحیح تنظیم و قفل می‌کند.

– اجرای قواعد اینترلاکینگ: این زیر حالت، قواعد اینترلاکینگ طراحی شده برای شبکه ریلی مد نظر را بر اساس اطلاعات پایه مدل‌سازی می‌کند و عملکرد صحیح المان‌های سوزن، بلاک و سیگنال را تضمین می‌کند. زیر حالت اینترلاکینگ نقشی اساسی در شبیه‌ساز ایفا می‌کند و سایر زیر حالت‌ها تنها در صورت اجازه زیر حالت اینترلاکینگ قادر به فعالیت خواهند بود.

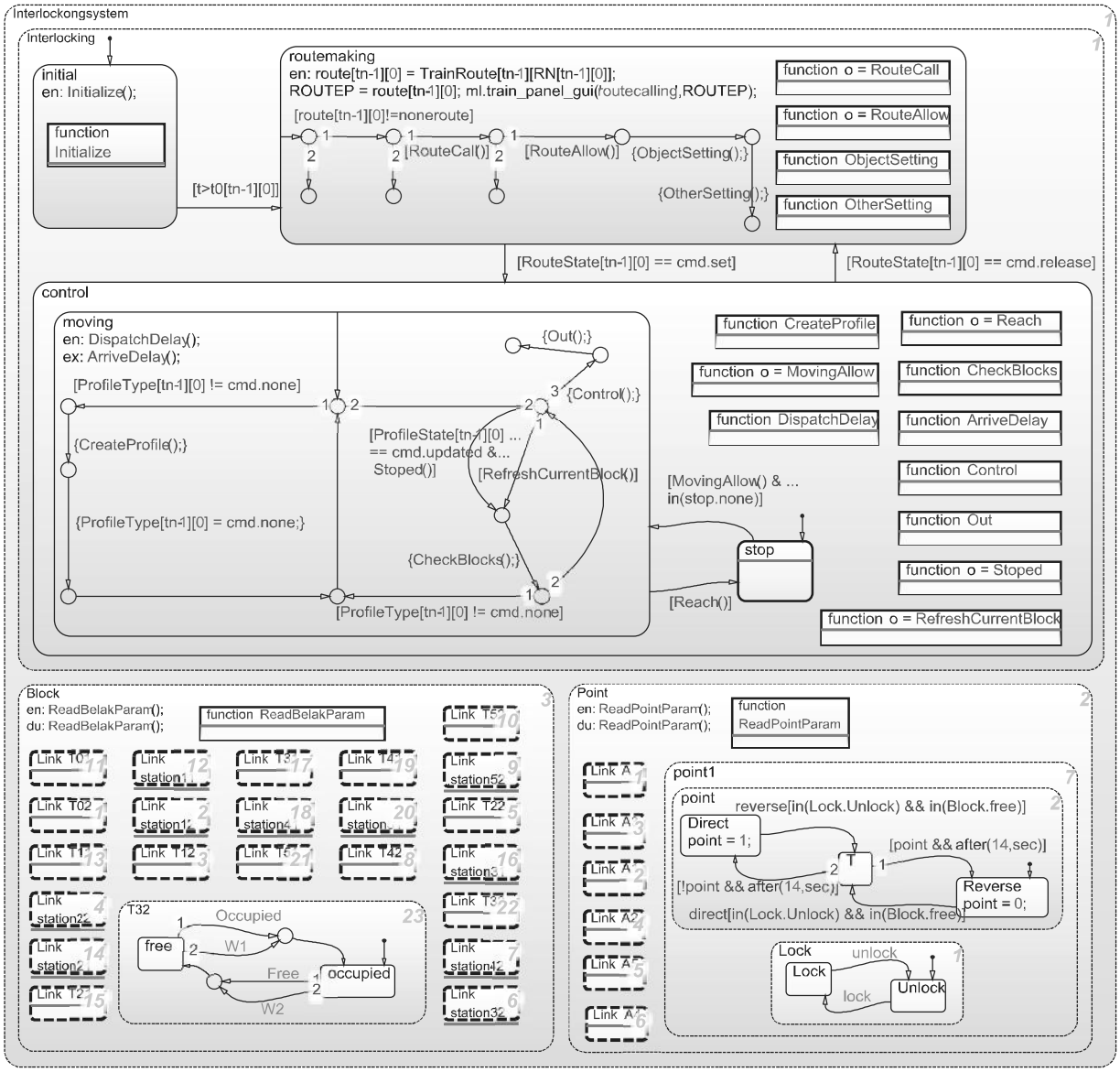
– اجرای قواعد ترافیکی: این زیر حالت، سیستم اینترلاکینگ را با سیستم‌های کنترل ترافیک مرتبط می‌کند. در واقع ارتباط دهنده مدل رویداد محور با سیستم‌های زمان محور است. این زیر حالت با دریافت مجوز لازم از سیستم اینترلاکینگ، توابع و سیستم‌های کنترل ترافیک و قطار را با توجه به قواعد اینترلاکینگ اجرا می‌کند.

### ٤-۱ مسیر سازی

در بخش مسیرسازی، سیستم اینترلاکینگ پس از دریافت مسیر از اعزام کننده، صحت مسیر و شرایط اختصاص مسیر برای قطار مثل خالی بودن خط و عدم تداخل با سایر مسیرها را بررسی می‌کند و در صورت مهیا بودن شرایط، المان‌های موجود در مسیر شامل سوزن‌ها و سیگنال‌ها را در وضعیت مناسب تنظیم و به قطار اجازه حرکت داده می‌شود. اگر شرایط ترافیکی برای اختصاص مسیر به یک قطار مهیا نباشد سیستم اینترلاکینگ تا زمان برآورده




**شکل ۵. دیاگرام عملکردی سیستم اینترلاکینگ**




**شکل ٦. سیستم اینترلاکینگ**

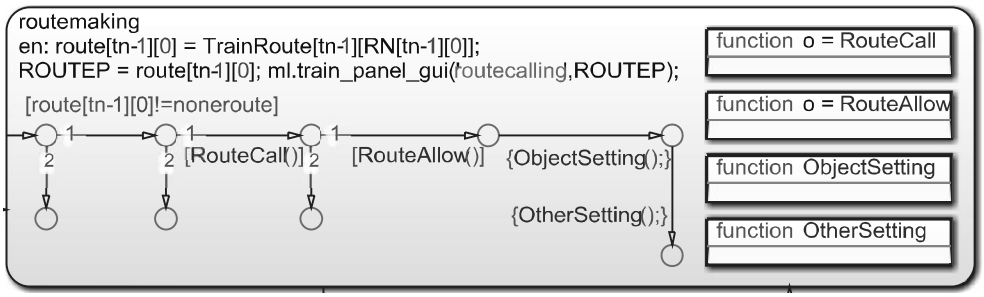
شدن تمامی شرایط ترافیکی منتظر می‌ماند، یا اینکه درخواست اختصاص مسیر توسط اعزام کننده لغو شود. در شکل ۷ جزئیات شبیه‌ساز بخش مسیر سازی سیستم اینترلاکینگ و در دیاگرام بلوکی شکل ۸ فرآیند مسیر سازی نمایش داده شده است.

**تابع بررسی صحت مسیر:** درشکل ۹ تابع گراف بررسی صحت مسیر نمایش داده شده است. این تابع برای مسیر درخواستی و مبدا فعلی قطار در اطلاعات پایه جستجو می‌کند و در صورت مجاز بودن مسیر درخواستی فرآیند مسیرسازی ادامه می‌یابد و در صورتی که مسیر درخواستی مجاز نباشد با اعلام خطا به اعزام کننده و معرفی مسیرهای مجاز برای قطار در موقعیت فعلی، منتظر مانده تا مسیر صحیح انتخاب شده یا درخواست مسیر لغو شود.

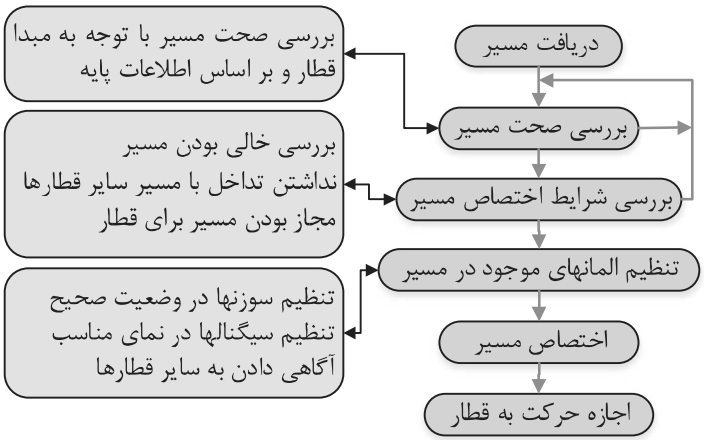
**تابع بررسی شرایط اختصاص مسیر:** در شکل ۱۰تابع گراف بررسی شرایط اختصاص مسیر به یک قطار نمایش داده شده

است. این تابع مسیرهای اختصاص یافته به سایر قطارها را بررسی می‌کند تا با مسیر درخواستی اعزام کننده دارای تداخل نباشند. در صورت وجود تداخل این تابع تا زمانی که تداخل از بین برود یا اینکه درخواست مسیر توسط اعزام کننده لغو شود، تکرار می‌شود.

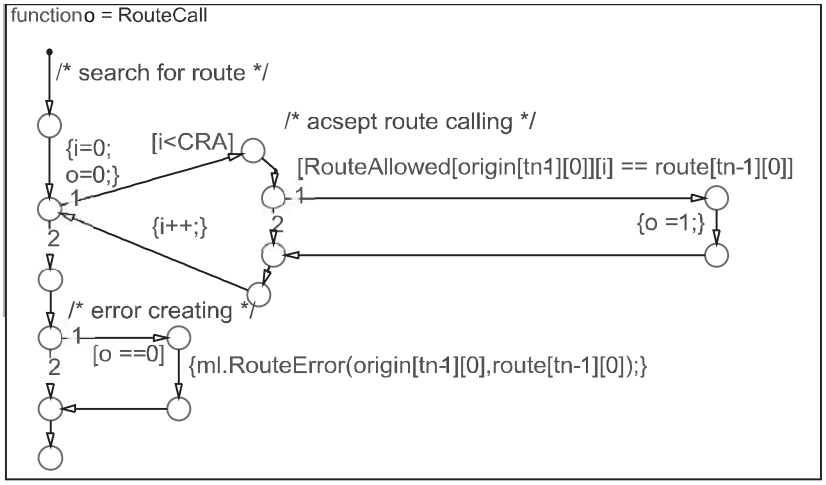
**تابع تنظیم المان‌های مسیر:** در شکل ۱۱تابع گراف تنظیم المان‌های مسیر نمایش داده شده است. این تابع با شناسایی تمامی المان‌های موجود در یک مسیر، اقدام به تنظیم آنها در وضعیت مناسب با توجه به اطلاعات پایه می‌کند. پس از انجام تنظیمات المان‌ها تا زمانی که قطار به مقصد برسد قفل می‌شوند و قادر به تغییر وضعیت نخواهند بود.



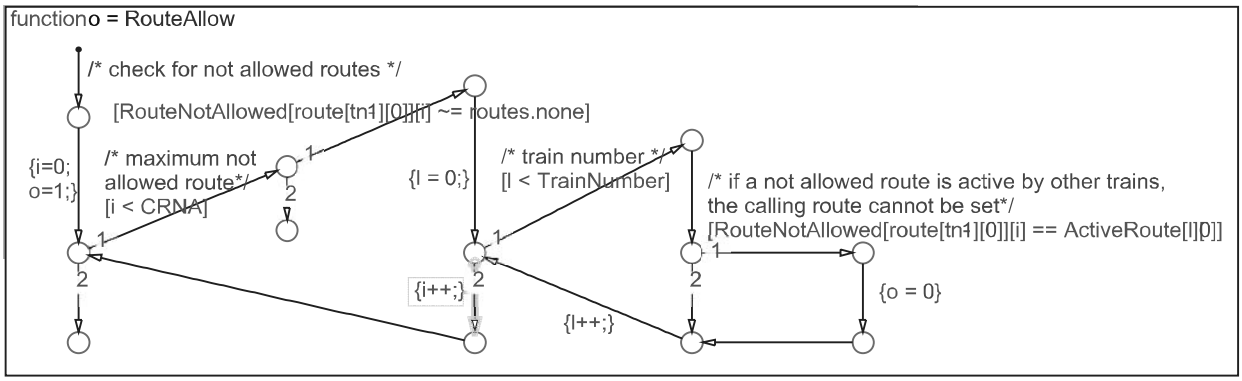

**شکل ۷. بخش مسیرسازی سیستم اینترلاکینگ**



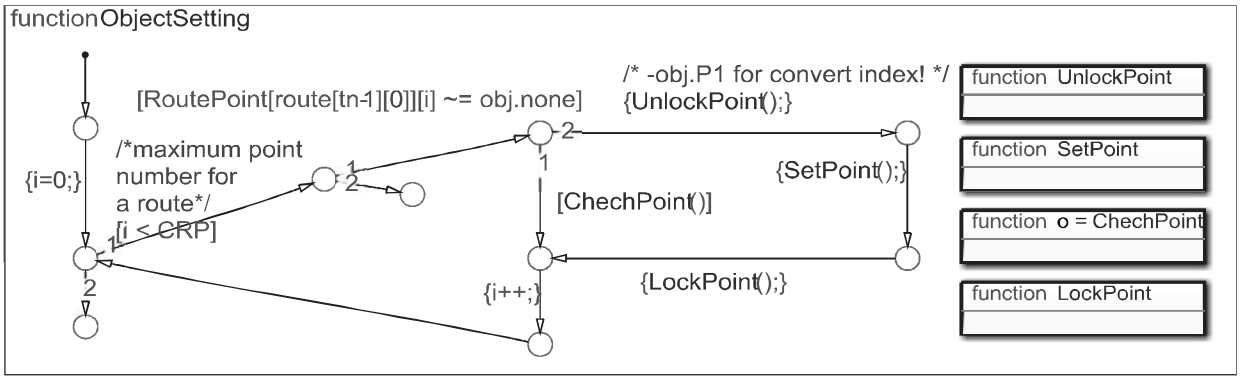

**شکل ۸. فرآیند مسیر سازی در سیستم اینترلاکینگ**




**شکل ۹. تابع بررسی صحت مسیر**




**شکل ۱۰. تابع بررسی شرایط اختصاص مسیر به قطار**




**شکل ۱۱. تابع تنظیم المان‌های مسیر**

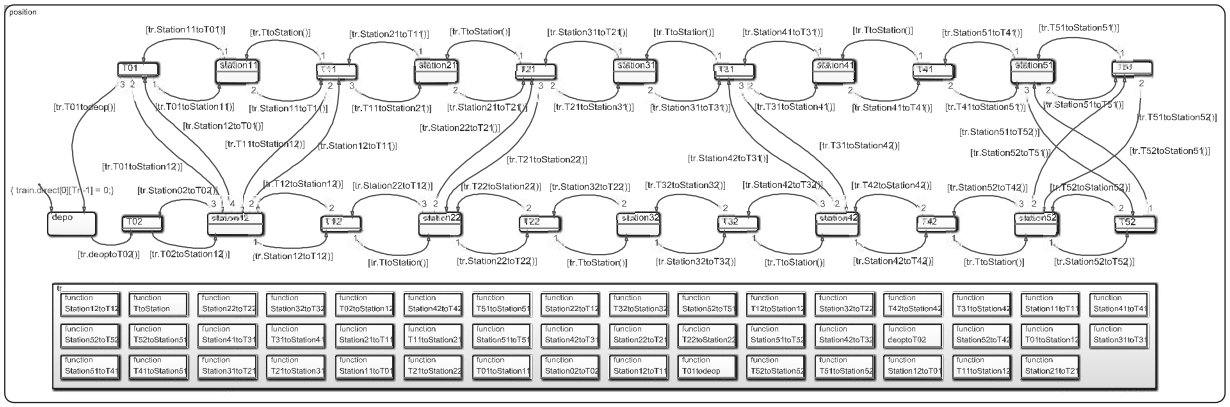
**ارسال اطلاعات به قطار:** در نهایت پس از اختصاص مسیر به یک قطار، مشخصات فیزیکی خط مانند محدودیت سرعت، شیب و فراز، قوس‌ها، جهت حرکت مجاز و ... به سیستم کنترل قطار ارسال می‌شود. از این اطلاعات برای هدایت و کنترل عملکرد شبکه ترافیکی استفاده می‌شود.

## ٤-٢ اجرای منطق اینترلاکینگ برای یک شبکه ریلی

این چارت قواعد سیستم اینترلاکینگ را بر اساس یک ساختار انحصاری اجرا می‌کند، به‌طوری‌که قطارها باید در یک حرکت پیوسته از بلاک‌های مجاور عبور کنند و تنها زمانی که بلاک جلویی خالی باشد به قطار اجازه ورود به بلاک بعدی داده می‌شود. این ویژگی با استفاده از ماهیت سیستم‌های گسسته پیشامد اجرا می‌شود و منجر به جلوگیری از بروز خطا در سیستم اینترلاکینگ می‌شود. در شکل ۱۲ حالت اجرای قواعد سیستم اینترلاکینگ نمایش داده شده است.

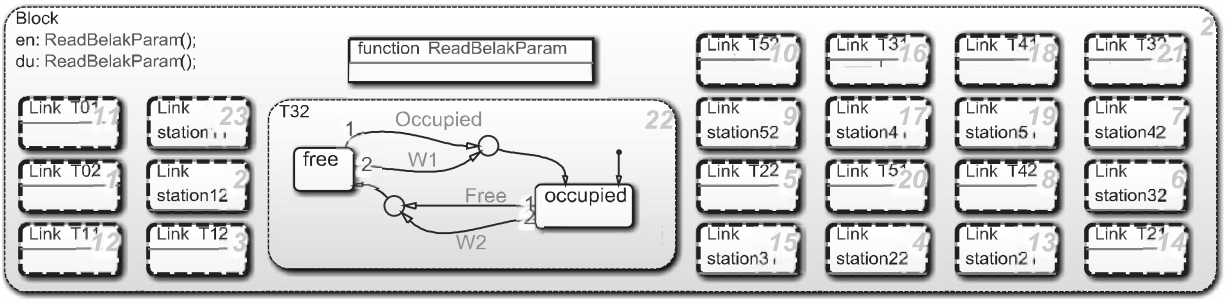
نحوه عملکرد این چارت به‌این صورت است که هر یک از حالت‌ها یک بلاک از شبکه ریلی را مدل می‌کند. قطار می‌تواند بر روی هر یک از بلاک‌ها قرار داشته باشد و برای حرکت در جهات مختلف ابتدا وضعیت بلاک بعدی بررسی شده و در صورتی که آن بلاک خالی باشد به قطار اجازه حرکت داده می‌شود. با عبور قطار از هر بلاک یک انتقال حالت رخ می‌دهد و وضعیت حالت‌های چارت را تغییر می‌دهد.

در انتقال‌ها، وضعیت بلاک، وضعیت سوزن و وضعیت سیگنال بررسی می‌شود و در صورتی که تمامی شرایط برآورده شوند انتقال حالت صورت می‌گیرد. در حالت‌ها مشخصات فیزیکی هر بلاک مثل طول، شیب، فراز، قوس، محدودیت سرعت و ... به سیستم کنترل ترافیک ارسال می‌شود تا برای هدایت قطارها مورد استفاده قرار بگیرد.

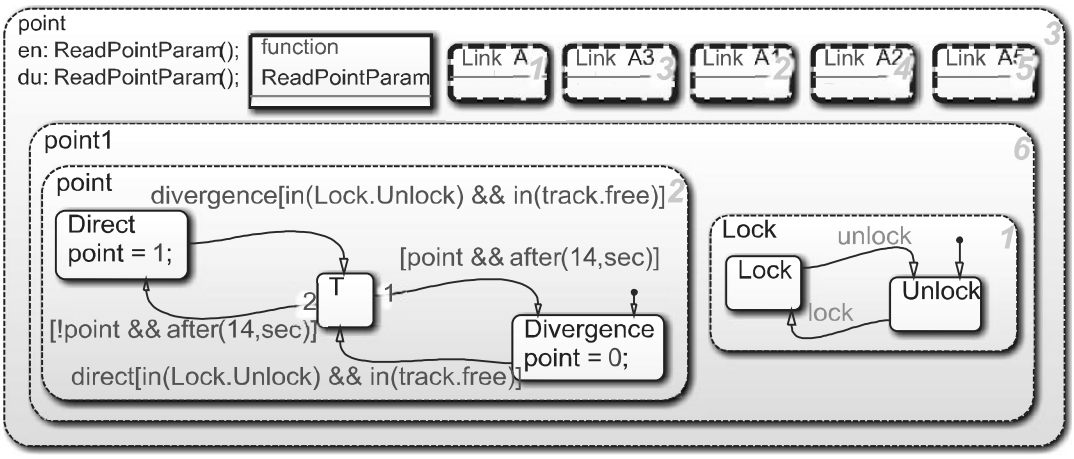


شکل ۱۲. اجرای قواعد اینترلاکینگ

وضعیت هر بلاک می‌تواند با وقوع یک پیشامد از ورود یا خروج قطار به آن بلاک، تغییر کند. هر بلاک با ساختار موازی طراحی می‌شود و با سایر بلاک‌ها به صورت همزمان فعال است. چارت بلاک در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. هر حالت موازی در این چارت، یک بلاک از شبکه ریلی را تشکیل می‌دهد که دارای دو زیر حالت اشغال و خالی است که با توجه به پیشامد رخ داده از ورود و خروجی قطار در بلاک‌ها تغییر حالت اتفاق می‌افتد. برای بررسی سیستم اینترلاکینگ در شرایط بروز خطا در عملکرد سیستم مدار راه، می‌توان از پیشامدهای اغتشاش استفاده کرد. چارت سوزن با توجه به درخواست سیستم اینترلاکینگ، سوزن‌ها را در جهت مناسب برای حرکت قطارها تنظیم می‌کند. شکل ۱٤ چارت سوزن را نمایش می‌دهد.




شکل ۱۳. چارت بلاک در سیستم اینترلاکینگ




شکل ۱٤. چارت سوزن در سیستم اینترلاکینگ

### ٤-٣ اجرای قواعد ترافیکی

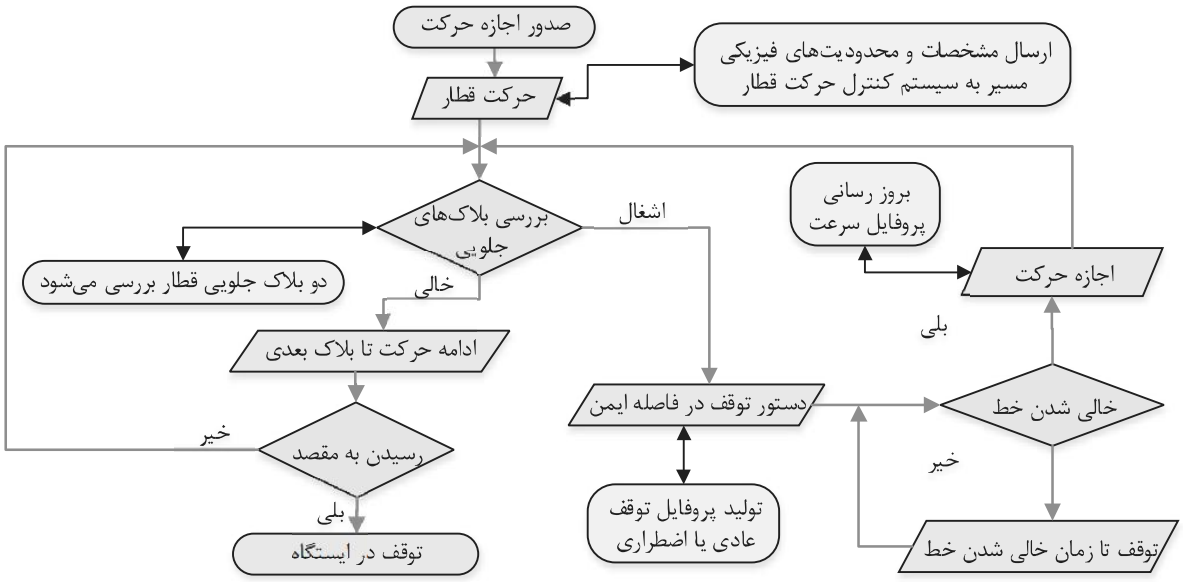
سیستم اینترلاکینگ پس از اختصاص مسیر به یک قطار و صدور اجازه حرکت، باید در تمام طول سفر شرایط ایمن برای حرکت قطار را فراهم کند. این امر با ایجاد یک فاصله ایمن بین قطارها حاصل می‌شود، به‌طوری‌که بین دو قطار متوالی یک یا دو بلاک خالی در نظر گرفته می‌شود و در تمام مدت سفر، عملکرد قطار بررسی می‌شود. نظارت بر روی عملکرد قطار شامل جلوگیری از حرکت با سرعت غیر مجاز، جلوگیری از حرکت در جهت اشتباه و اجرای سایر محدودیت‌های ترافیکی است.

عملکرد سیستم اینترلاکینگ پس از اختصاص مسیر به یک قطار در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. با صدور اجازه حرکت، قطار شروع به حرکت می‌کند تا به ابتدای بلاک بعدی برسد، در این هنگام یک یا چند بلاک پیش روی قطار که متناسب با طول بلاک‌ها و سرعت قطار توسط طراح تعیین شده، جهت خالی بودن مسیر بررسی می‌شوند. اگر بلاک‌های جلویی خالی باشند قطار به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به بلاک بعدی برسد و در نهایت وارد ایستگاه مقصد شود، ولی اگر بلاک‌های جلویی قطار خالی نباشد، یا خط مسدود شده باشد، سیستم اینترلاکینگ به سیستم کنترل ترافیک و هدایت قطار دستور می‌دهد تا قطار را متوقف کند. قطار تا زمان باز شدن مسیر اجازه حرکت مجدد نمی‌یابد و در صورت خالی شدن مسیر به قطار اجازه حرکت داده می‌شود.

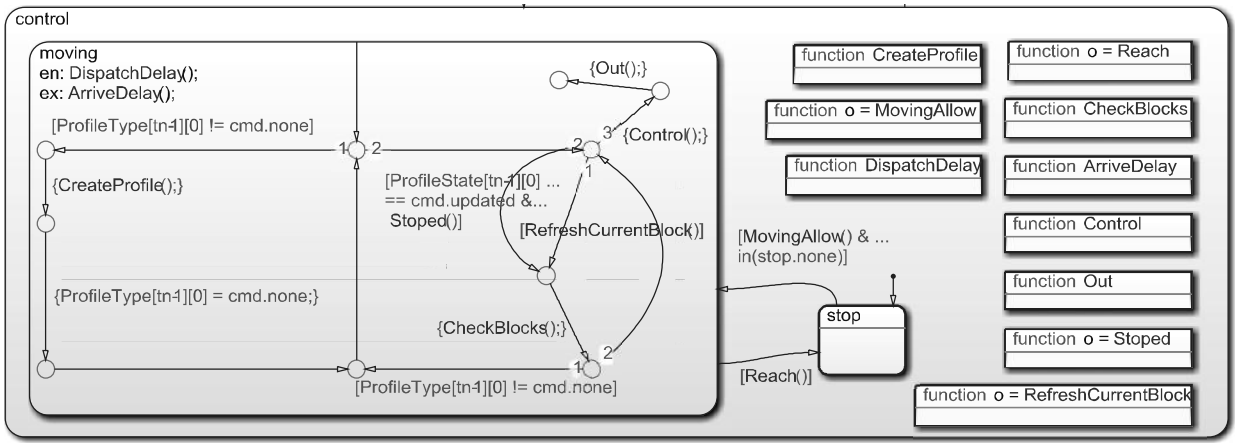
فرآیند اجرای قواعد ترافیکی و ایمنی شبکه ترافیکی، در بخشی به نام کنترل ترافیک که جزئی از سیستم اینترلاکینگ است انجام می‌گیرد که در شکل ١٦ نمایش داده شده است. این بخش در واقع وظیفه اجرای قواعد ترافیکی بر مبنای اطلاعات پایه و بر اساس دینامیک رویداد محور را دارد.

بخش کنترل ترافیک در سیستم اینترلاکینگ دارای دو زیر حالت حرکت و توقف است. زیر حالت حرکت، در زمان حرکت قطار بین دو ایستگاه و زیر حالت توقف، در زمان توقف قطار در ایستگاه فعال هستند.

**زیر حالت حرکت:** در این زیر حالت، یک فلوگراف کنترلی طراحی شده است که پس از صدور اجازه حرکت به قطار، در فواصل زمانی تعیین شده (مطابق با زمان نمونه برداری) اجرا می‌شود. این فلوگراف به تابع تولید پروفایل حرکتی، مشخصات فیزیکی مسیر و سایر اطلاعات مورد نیاز را ارسال می‌کند تا پروفایل سرعت مناسب برای مسیر تولید شود. سپس قطار توسط تابع کنترل حرکت شروع به حرکت کرده تا به انتهای بلاک خود




**شکل ۱۵. عملکرد سیستم اینترلاکینگ پس از اختصاص مسیر به قطار**




**شکل ۱۶. بخش کنترل ترافیک در سیستم اینترلاکینگ**

برسد. در این هنگام وضعیت بلاک‌های جلویی قطار بررسی شده تا تصمیم مناسب برای ادامه حرکت، کاهش سرعت و یا توقف قطار اتخاذ شود. این روند تا رسیدن قطار به مقصد ادامه می‌یابد. ارتباط بین زیر حالت حرکت و سیستم کنترل حرکت قطار به صورت اجرای توابع کنترل ترافیک و دریافت نتایج این توابع و اعمال آن‌ها به شبکه ترافیکی است. به طور مثال زیر حالت حرکت با فراخوانی تابع کنترل حرکت، مقادیر سرعت، شتاب و موقعیت دقیق قطار را دریافت می‌کند و در صورت عدم رعایت محدودیت‌های فیزیکی اقدامات لازم جهت حفظ ایمنی را انجام می‌دهد. زیر حالت حرکت تمامی رویدادهای ترافیکی از جمله ورود و خروج قطار، مسدود شدن مسیر، انحراف از برنامه زمانی در اعزام قطار، اشغال بلاک توسط قطار و ... را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

**زیر حالت توقف:** پس از رسیدن قطار به مقصد، زیر حالت توقف فعال می‌شود. در این حالت قطار مطابق با اطلاعات پایه، قطارها را در ایستگاه متوقف می‌کند. زمان توقف می‌تواند توسط سیستم اعزام کننده جهت جبران تاخیر تغییر کند. در نهایت اعزام کننده مسیر جدیدی برای قطار درخواست می‌کند و تمامی فرآیند ترافیکی برای مسیر جدید دوباره اجرا می‌شوند. مسیر قبلی نیز برای استفاده سایر قطارها آزاد می‌شود.

در بخش اجرای قواعد ترافیکی از سیستم اینترلاکینگ، توابع مختلفی بکار گرفته شده‌اند که عبارتند از:

**تابع اعزام:** این تابع پس از اختصاص مسیر به قطار، اطلاعات سفر مثل زمان سیر تا مقصد را در اختیار سیستم کنترل قطار قرار می‌دهد و مطابق با برنامه زمانی تعریف شده قطار را اعزام می‌کند. در این تابع استراتژی‌های اعزام قطارها اجرا می‌شوند که شامل بازیابی برنامه زمانی و زمان سیر قطارها برای جبران تاخیر، مشاهده وضعیت ترافیکی مسیر قطار و اتخاذ تصمیمات مناسب برای جلوگیری از توقف قطار در طول مسیر و بروز اغتشاش ترافیکی است.

زمان اعزام قطار شماره $i$ از ایستگاه $k$ام با عبارت بیان $t^i_k$ می‌شود و همچنین رابطه زمان اعزام قطار $i$ از دو ایستگاه پیاپی $k$ و $k+1$ عبارت است از:

$$t^i_{k+1} = t^i_k + r^i_k + s^i_{k+1} \qquad (۱)$$

که $r^i_k$ زمان سفر قطار $i$ بین دو ایستگاه $k$ و $k+1$ است و $s^i_k$ زمان توقف قطار $i$ در ایستگاه $k$ است.

زمان سفر بین دو ایستگاه با رابطه (۲) بیان می‌شود که $R^i_k$ زمان سفر نامی بین دو ایستگاه، $u^i_k$ سیگنال کنترلی که سیستم اعزام کننده برای بازیابی جدول زمانی و جبران تاخیر اعمال می‌کند ($u^i_k > 0$ برای افزایش زمان سفر و $u^i_k < 0$؛ برای کاهش زمان سفر) و $w\,1^i_k$ به منظور مدل سازی اغتشاش در نظر گرفته شده است.

$$r^i_k = R^i_k + u^i_k + w\,1^i_k \qquad (۲)$$

زمان توقف قطار در ایستگاه $k+1$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود که $S$ زمان نامی توقف قطار در ایستگاه، $u2^i_k$ سیگنال کنترلی

که سیستم اعزام کننده برای جبران تاخیر و توزیع مسافران بین قطارها اعمال می‌کند و $w2^i_k$ برای اغتشاش است.

$$s^i_{k+1} = S + u2^i_k + w2^i_k \quad (۳)$$

انحراف از برنامه زمانی اعزام قطارها با رابطه (٤) بیان می‌شود که $T^i_k$ زمان نامی اعزام قطار $i$ از $k$ ایستگاه است.

$$d^i_k = t^i_k - T^i_k \quad (٤)$$

سرفاصله دو قطار پیاپی در یک ایستگاه با رابطه (٥) بیان می‌شود.

$$H = T^{i+1}_k - T^i_k \quad (٥)$$

**تابع درخواست پروفایل سرعت:** این تابع پس از اختصاص مسیر به قطار، مشخصات مسیر، مشخصات قطار و محدودیت‌های ترافیکی را به الگوریتم تولید پروفایل سرعت ارسال می‌کند و پروفایل تولید شده را در اختیار سیستم کنترل قطار قرار می‌دهد. این تابع همچنین در مواقع ضروری (ترمز اضطراری در هنگام خطر) دستورات و اطلاعات مورد نیاز برای بروز رسانی پروفایل سرعت را در اختیار الگوریتم تولید پروفایل قرار می‌دهد.

**تابع نظارت ترافیکی:** این تابع متشکل از چند زیر تابع است که بر عملکرد شبکه ترافیک ریلی نظارت دارند. این توابع وظیفه نظارت بر جهت حرکت، سرعت، موقعیت و توقف قطار را برعهده دارند.

### ٤-٤ توسعه سیستم اینترلاکینگ

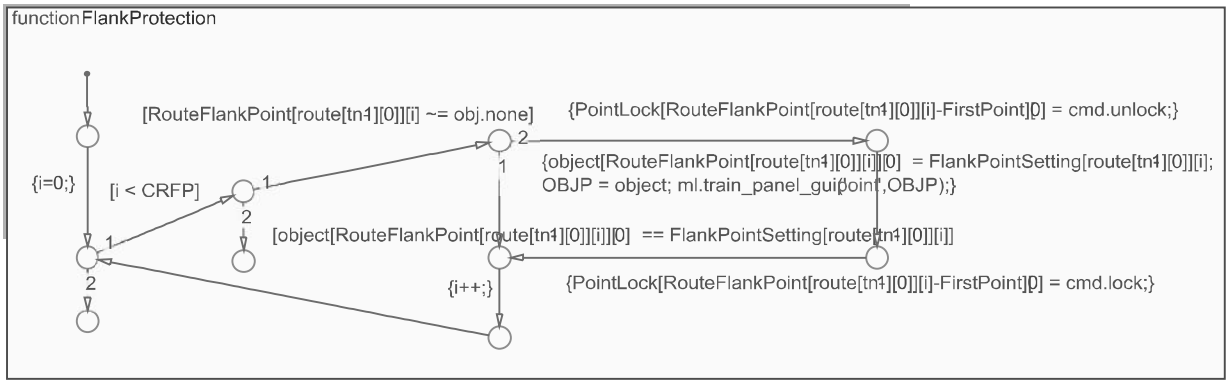
سیستم اینترلاکینگ در شبکه‌های ریلی مختلف دارای تفاوت‌هایی است که نیازمند توابع ترافیکی جدید بر اساس استانداردهای مختلف است، این توابع می‌توانند برای وظایف مختلفی مثل عمل شانت، مسیرسازی، توابع تضمین ایمنی قطار، حفاظت از پهلو (فلنک) و ... طراحی شوند. بنابراین شبیه ساز طراحی شده نیز می‌بایست دارای این ویژگی باشد که قوانین اینترلاکینگ حاکم بر آن را کاربر بتواند تغییر و یا توسعه دهد. در این بخش نحوه توسعه و افزودن توابع کنترلی به سیستم اینترلاکینگ، در محیط جعبه ابزار Stateflow شرح داده می‌شود.

توسعه سیستم اینترلاکینگ می‌تواند به صورت افزودن یک مد عملکردی یا یک تابع به مدهای عملکردی موجود در سیستم اینترلاکینگ باشد. برای افزودن یک مد عملکردی مثل عمل شانت که در سطح سلسله مراتبی سیستم اجرای قواعد ترافیکی است، یک زیرحالت که وظایف عمل شانت کردن را انجام می‌دهد در سطح چارت سیستم اینترلاکینگ طراحی می‌کنیم و برای افزودن یک تابع جدید در ابتدا باید در نظر گرفته شود که تابع در کدام مد عملکردی و چه سطح سلسله مراتبی از زیرحالت‌های سیستم اینترلاکینگ قرار دارد. به طور مثال تابع حفاظت از پهلو جزء زیر حالت مسیرسازی در سیستم اینترلاکینگ است و تابع مورد نظر در سطح سلسله مراتبی این زیر حالت قرار می‌گیرد. تابع حفاظت از پهلو را به زیرحالت مسیرسازی در سیستم اینترلاکینگ اضافه می‌کنیم. این تابع پس از تنظیم المان‌های ترافیکی مسیر، اجرا شده و سوزن‌ها را متناسب با هر مسیر برای حفاظت از پهلو، در وضعیت مناسب تنظیم می‌کند.

برای طراحی الگوریتم تابع مورد نظر می‌توان از توابع Sim-ulink، MATLAB، گرافیکی و جدول صحت استفاده کرد. در شکل ۱۷ تابع حفاظت از پهلو نمایش داده شده است، برای افزودن این تابع ابتدا اطلاعات پایه (سوزن‌ها و تنظیم آن‌ها برای هر مسیر درخواستی) مربوط به حفاظت از پهلو به سیستم اینترلاکینگ معرفی می‌شود و سیستم اینترلاکینگ پس از تنظیم المان‌های ترافیکی مسیر، سوزن‌های حفاظت از پهلو را نیز تنظیم می‌کند.

## ۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا عملکرد المان‌های شبیه‌ساز شبکه ریلی در صورت رخ دادن پیشامدهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و سپس سیستم اینترلاکینگ برای دو شبکه ریلی طراحی شده و استراتژی‌های مختلف بر روی این مدل‌ها شبیه‌سازی می‌شود و تنظیمات المان‌های شبکه ریلی، فرآیند مسیرسازی، ارتباط با سیستم کنترل ترافیک و اعلام هشدار به قطارها در مواقع مسدود شدن خط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

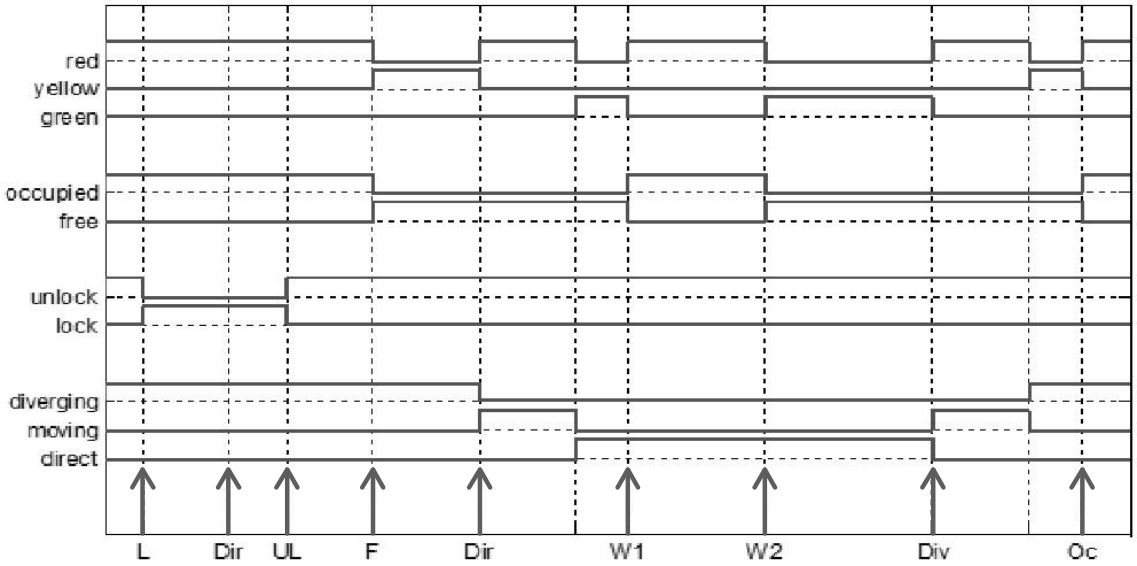



**شکل ۱۷. تابع حفاظت از پهلو (فلنک)**

## ۵-۱ بررسی عملکرد المان‌های شبکه ریلی

در این بخش مدل طراحی شده در بخش٤ برای یک سیستم اینترلاکینگ ساده که متشکل از یک سوزن، سیگنال و بلاک است را شبیه‌سازی می‌کنیم. این مدل در شکل ٤ نمایش داده شده است.

این مدل دارای ۹ پیشامد است که رخ دادن هر یک موجب انتقال حالت در مدل می‌شود. برای شبیه‌سازی پیشامدهای قفل سوزن، سوزن در وضعیت مستقیم (نرمال)، آزاد شدن قفل سوزن، خالی بودن بلاک، سوزن در وضعیت مستقیم (نرمال)، اغتشاش در اشغال شدن بلاک، اغتشاش در خالی شدن بلاک، سوزن در وضعیت معکوس و اشغال بودن بلاک به ترتیب رخ می‌دهند. در ابتدای شبیه‌سازی به طور پیش فرض حالت‌های سیگنال قرمز، بلاک اشغال، قفل سوزن آزاد و در وضعیت معکوس فعال هستند. تغییرات حالت در مدل طراحی شده به صورت شکل ۱۸ است. هر حالت دارای دو مقدار برای نشان دادن وضعیت است که مقدار بیشینه نشان دهنده فعال بودن حالت و مقدار کمینه نشان دهنده غیرفعال بودن آن حالت است. تغییرات حالت ها در شکل ۱۸، بر اثر رخداد پیشامدهای اعمال شده به مدل به ترتیب در جدول ۲ نمایش داده شده است.




**شکل ۱۸. تغییرات حالت در مدل اینترلاکینگ**

جدول ۲. تغییرات حالت در صورت رخداد پیشامدهای مختلف

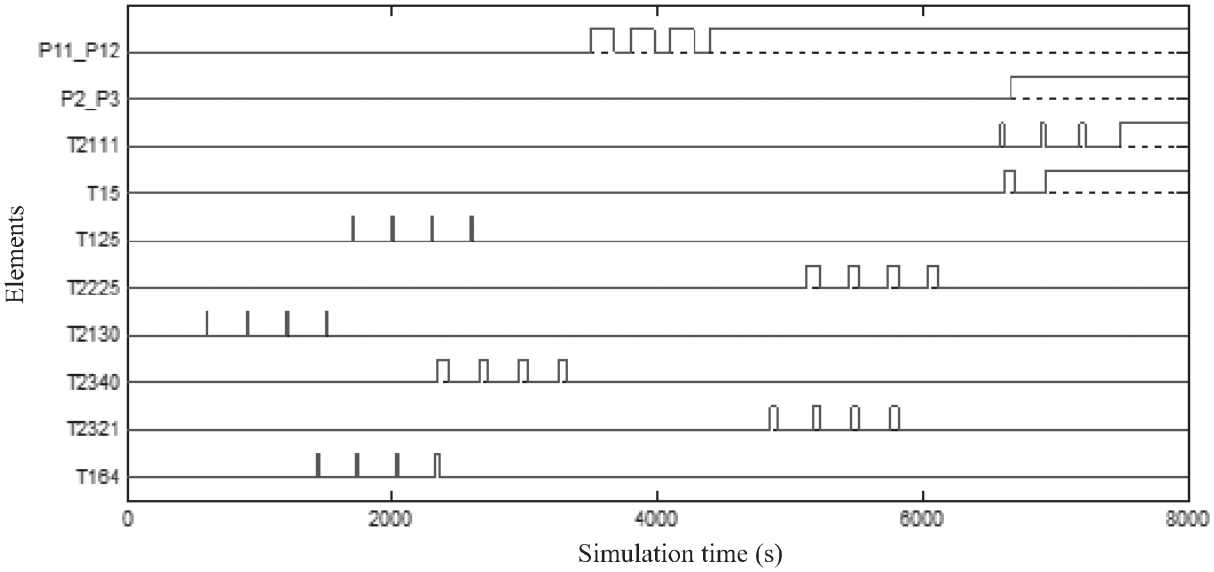
| پیشامد | نماد | تغییرات حالت پس از رخداد پیشامد |
|---|---|---|
| lock | L | حالت قفل سوزن فعال می‌شود و سایر حالت‌ها تغییر نمی‌کنند. |
| direct | Dir | بدلیل فعال بودن قفل سوزن هیچ تغییر حالتی صورت نمی‌گیرد. |
| unlock | UL | حالت قفل سوزن غیر فعال می‌شود و سایر حالت‌ها تغییر نمی‌کنند. |
| Free | F | حالت خالی بودن بلاک و حالت سیگنال زرد فعال می‌شود. |
| Direct | Dir | سوزن در حالت تغییر وضعیت به مستقیم و حالت سیگنال قرمز فعال می‌شود. |
| – | | سوزن در حالت وضعیت مستقیم و حالت سیگنال زرد فعال می‌شود. این انتقال حالت بر اثر یک پیشامد محلی است که ۱٤ ثانیه پس از رخداد پیشامد تغییر وضعیت سوزن رخ می‌دهد. |
| W1 | W1 | یک پیشامد اغتشاش است که وضعیت بلاک را به حالت اشغال تغییر می‌دهد و حالت سیگنال قرمز می‌شود. |
| W2 | W2 | یک پیشامد اغتشاش است که وضعیت بلاک را به حالت خالی تغییر میدهد و حالت سیگنال سبز فعال می‌شود. |
| divergence | Div | سوزن در حالت تغییر وضعیت به معکوس و حالت سیگنال قرمز فعال می‌شود. |
| – | | سوزن در حالت معکوس و حالت سیگنال سبز فعال می‌شود. این انتقال حالت بر اثر یک پیشامد محلی است که ۱٤ ثانیه پس از رخداد پیشامد تغییر وضعیت سوزن رخ می‌دهد. |
| occupied | Oc | حالت خالی اشغال بلاک و حالت سیگنال قرمز فعال می‌شود. |

### ۵-۲ شبیه‌سازی شبکه ریلی خط ۲ متروی تهران

شبکه ریلی خط ۲ متروی تهران به طول ۲٤/۲ کیلومتر شامل ۲۲ ایستگاه است که به صورت دو خط رفت و برگشت متشکل از ۲۳۵ بلاک و ۱۷ عدد سوزن است. برای سیستم اینترلاکینگ قابلیت حرکت در هر دو خط و در هر دو جهت در نظر گرفته شده است و تعداد ۱٤۲ مسیر ممکن در این شبکه تعریف شده که تمامی قطارها مجاز به حرکت در آن‌ها هستند. تمامی مشخصات فیزیکی، مسیرها و قواعد ترافیکی، در قالب نرم‌افزار اکسل تعریف شده‌اند و برای مدل‌سازی بکار گرفته می‌شوند.

**بررسی وضعیت المان‌های شبکه ریلی:** در شکل ۱۹ وضعیت تعدادی از المان‌های شبکه ریلی نمایش داده شده است. نمودارهای با حرف اول T برای بلاک‌ها و حرف اول P وضعیت سوزن‌ها را نمایش می‌دهند. مشخصات هر یک از المان‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. در نمودارها مقدار بیشینه، برای بلاک‌ها نشان دهنده اشغال شدن آن و برای سوزن‌ها تنظیم برای وضعیت معکوس است، همچنین مقدار کمینه برای بلاک‌ها نشان دهنده خالی بودن آن و برای سوزن‌ها تنظیم برای مسیر مستقیم است. وضعیت هر بلاک بر اساس اشغال شدن آن توسط قطار در حین شبیه‌سازی به صورت رویداد محور و مستقل از زمان تغییر می‌کند. نحوه تشخیص اشغال بلاک بر اساس موقعیت اعلامی سیستم کنترل حرکت قطار به سیستم اینترلاکینگ است. سوزن‌ها بر اساس اطلاعات پایه برای هر مسیر درخواستی در صورت برقراری شرایط توسط سیستم اینترلاکینگ در وضعیت صحیح تنظیم و قفل می‌شوند و تا زمان آزاد شدن مسیر در حالت قفل باقی می‌مانند. با بررسی وضعیت اشغال شدن بلاک‌های متوالی در یک مسیر مشاهده می‌شود که در طول سفر همیشه بین دو قطار حداقل یک بلاک خالی وجود دارد که ایمنی حرکت قطارها را تضمین می‌کند.

**ارتباط سیستم اینترلاکینگ با سیستم هدایت قطار:** در این بخش ارتباط سیستم اینترلاکینگ با سیستم هدایت قطار بررسی می‌شود. اعزام کننده مطابق جدول زمانی برای قطارها درخواست اختصاص مسیر می‌کند و سیستم اینترلاکینگ در صورت مهیا بودن شرایط اختصاص مسیر، با تنظیم المان‌ها، مسیر را به قطار اختصاص می‌دهد. سپس سیستم اینترلاکینگ مشخصات فیزیکی و محدودیت‌های هر بخش از مسیر را در اختیار سیستم هدایت قطار قرار می‌دهد و در تمام طول سفر،

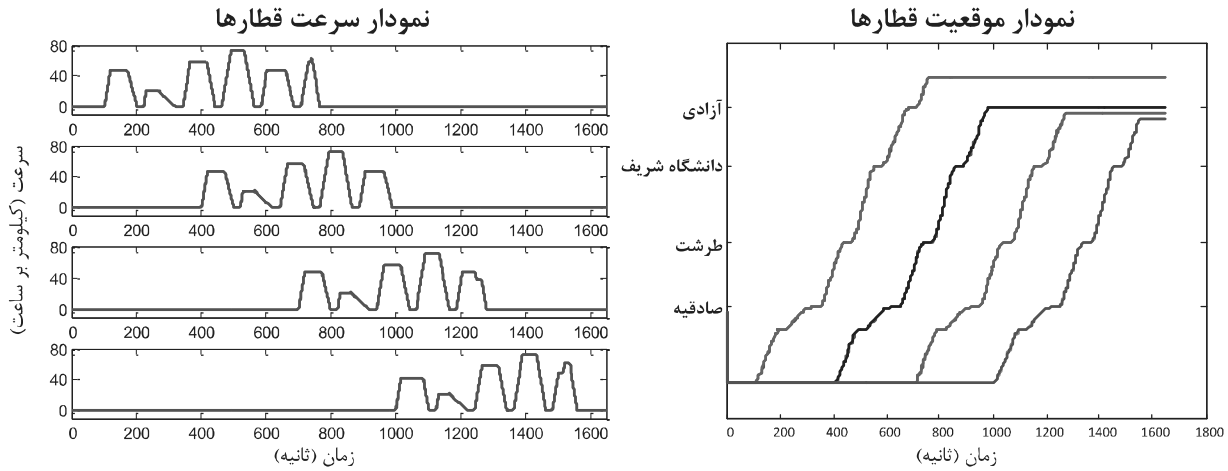



**شکل ۱۹. وضعیت المان‌های شبکه ریلی**

**جدول ۳. مشخصات المان‌های شبکه ریلی**

| المان | نوع | موقعیت المان در شبکه ریلی |
|---|---|---|
| P11_P12 | سوزن | سوزن شانت در انتهای مسیر (ایستگاه فرهنگسرا) |
| P2_P3 | سوزن | سوزن شانت در ابتدای مسیر (ایستگاه صادقیه) |
| T2111 | بلاک | بلاک بین ایستگاه طرشت و صادقیه در بازه ۲۵۸ تا ۵۸۰ متری |
| T15 | بلاک | بلاک سکوی شمالی ایستگاه صادقیه در بازه ۱۱۵- تا ۱۹۵ متری |
| T125 | بلاک | بلاک بین ایستگاه ملت و بهارستان در بازه ۱۰۰٤٦ تا ۱۰۲٥٦ متری |
| T2225 | بلاک | بلاک سکوی شمالی ایستگاه بهارستان در بازه ۱۰٦۷٤ تا ۱۰۸٦٤ متری |
| T2130 | بلاک | بلاک بین ایستگاه دانشگاه شریف و آزادی در بازه ۲۸۰۱ تا ۳۰۳۸ متری |
| T2340 | بلاک | بلاک سکوی جنوبی ایستگاه سبلان در بازه ۱٤۸٥۸ تا ۱٥۰٥۸ متری |
| T2321 | بلاک | بلاک سکوی شمالی ایستگاه امام حسین در بازه ۱۲٤۰۹ تا ۱۲٥۹۹ متری |
| T164 | بلاک | بلاک بین ایستگاه حسن آباد و امام خمینی در بازه ۸۸٤۰ تا ۹۱٤۹ متری |

شرایط ایمن برای حرکت قطار را فراهم می‌کند. در این سناریوی شبیه‌سازی برنامه سفر قطارها حرکت از ایستگاه اول با سرفاصله ۵ دقیقه است و محدودیت سرعت حرکت قطارها ۸۰ کیلومتر بر ساعت و محدودیت شتاب ۱ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. هدف از این بخش، شبیه‌سازی یک سیستم هدایت قطار در شبکه ریلی با در نظر گرفتن قواعد اینترلاکینگ است و برای بررسی عملکرد سیستم اینترلاکینگ، یک اغتشاش به صورت مسدود نمودن یک بلاک بین دو ایستگاه آزادی و نواب صفوی اعمال می‌شود. سیستم اینترلاکینگ با توجه به مسدود بودن مسیر، برای حفظ شرایط ایمن به قطار اول دستور کاهش سرعت و توقف کامل می‌دهد و با ادامه یافتن توقف قطار اول، سیستم اینترلاکینگ به قطارهای بعدی نیز دستور توقف ارسال می‌کند و تا زمان رفع اغتشاش به قطارها اجازه حرکت نمی‌دهد. رفتار مدل ترافیکی در برابر اغتشاش در شکل ۲۰ نمایش داده شده است که قطارها با فاصله یک بلاک از هم متوقف می‌شوند.



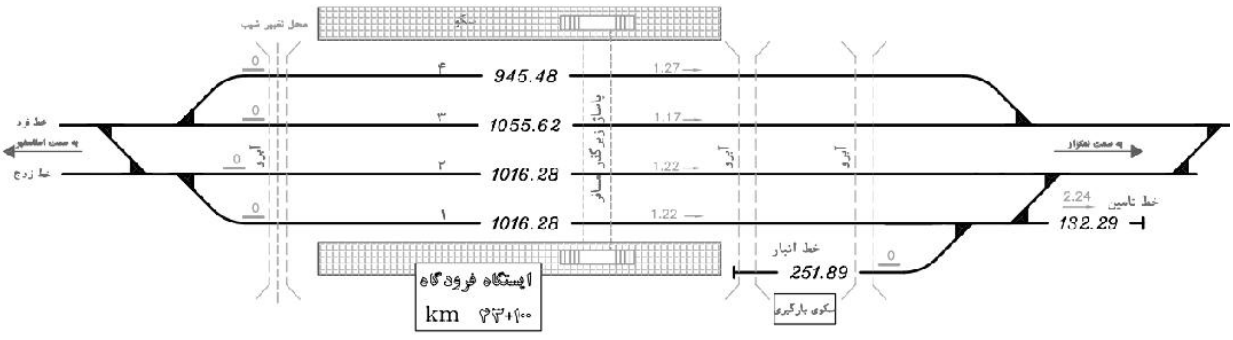

**شکل ۲۰. نمودارهای سرعت و موقعیت قطار در حالت بروز اغتشاش**

## ۵-۳ بکارگیری شبیه‌ساز در شبیه‌سازی یک ایستگاه قطار

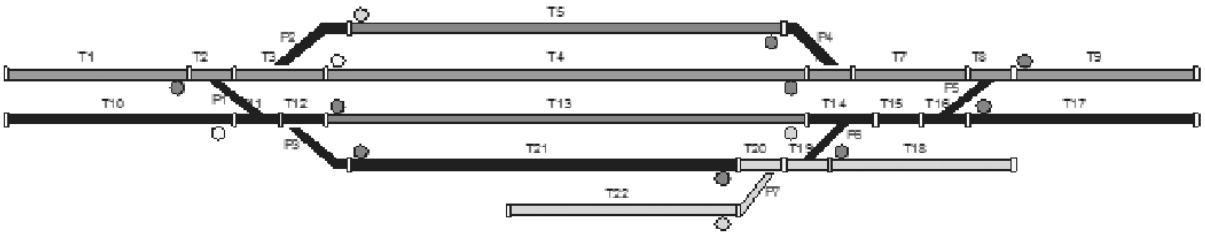
در این بخش ایستگاه راه‌آهن فرودگاه که دارای ٤ خط است مدل‌سازی می‌شود. این ایستگاه که در شکل ۲۱ نمایش داده شده متشکل از ۲۲ بلاک، ١٤ محل توقف، ۷ سوزن و ٣٦ مسیر مجاز برای حرکت قطارها است و در سیستم اینترلاکینگ به قطارها اجازه حرکت در هر دو جهت داده شده است. موقعیت بلاک‌ها، سوزن‌ها و سیگنال‌های این ایستگاه مطابق پانل شکل ۲۲ است.

**نمایش گرافیکی ایستگاه فرودگاه:** برای نمایش گرافیکی ایستگاه فرودگاه، پانل گرافیکی شکل ۲۲ طراحی شده است. این پانل گرافیکی وضعیت تمامی المان‌ها و شرایط ترافیکی را در حین شبیه‌سازی به کاربر نمایش می‌دهد. این پانل وضعیت اشغال بلاک‌ها، تنظیم سوزن، سیگنال، مسیر درخواستی و مسیر اختصاص یافته به یک قطار را به صورت گرافیکی در حین شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. در این پانل وضعیت اشغال بلاک‌ها با رنگ قرمز، درخواست مسیر با رنگ صورتی، اختصاص مسیر با رنگ سبز و سیگنال‌ها با رنگ‌های زرد، سبز و قرمز و همچنین وضعیت تنظیم سوزن با تغییر شکل به صورت اتصال و جدا شدن به خط نمایش داده می‌شود.

**اجرای شبیه‌سازی سناریوی ترافیکی:** در این سناریو از ۲ قطار برای شبیه‌سازی استفاده شده است که هر یک در مسیر مشخصی از این ایستگاه عبور می‌کند. برنامه مورد نظر برای سفر قطارها در جدول ٤ ارایه شده است. هدف از این سناریو بررسی عملکرد شبیه ساز در تنظیم المان‌های شبکه ریلی ایستگاه با توجه به مسیر درخواستی هر قطار است.




**شکل ۲۱. شبکه ریلی ایستگاه فرودگاه**

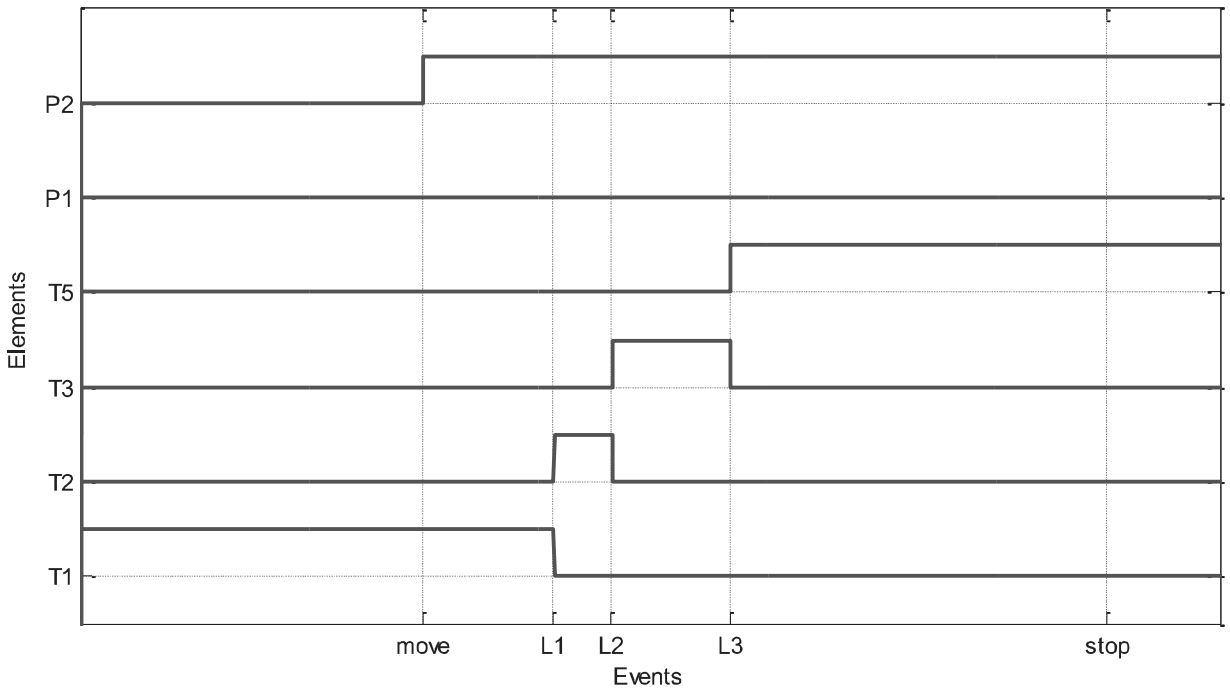



**شکل ۲۲. پانل گرافیکی ایستگاه فرودگاه**

**جدول ٤. برنامه سفر قطارها در ایستگاه فرودگاه**

| | |
|---|---|
| **قطار اول** | در بلاک T1 قرار دا شته و با عبور از بلاک‌های T2، T3 و سوزن‌های P1، P2 وارد بلاک T6 می شود و در کنار سکو توقف می‌کند. |
| **قطار دوم** | در بلاک T10 قرار دا شته و با عبور از بلاک‌های T11، T12 و سوزن‌های P1، P3 وارد بلاک T13 می شود و در کنار سکو توقف می‌کند. |
| | مجددا از بلاک T13 شروع به حرکت کرده و با عبور از بلاک‌های T14، T15، T16، T8 و سوزن‌های P5، P6 وارد بلاک T9 می‌شود و از ایستگاه خارج می‌شود. |

وضعیت المان‌های موجود در شبکه ریلی که توسط قطار اول، وضعیت آنها تغییر می‌کند در شکل ۲۳نمایش داده شده است. نمودارهای با حرف اول T برای بلاک‌ها و حرف اول P وضعیت سوزن‌ها را نمایش می‌دهند. در نمودارها مقدار بیشینه، برای بلاک‌ها نشان دهنده اشغال شدن آن و برای سوزن‌ها تنظیم برای وضعیت معکوس است، همچنین مقدار کمینه برای بلاک‌ها نشان دهنده خالی بودن آن و برای سوزن‌ها تنظیم برای مسیر مستقیم است.




**شکل ۲۳. وضعیت المان‌های مسیر قطار اول**

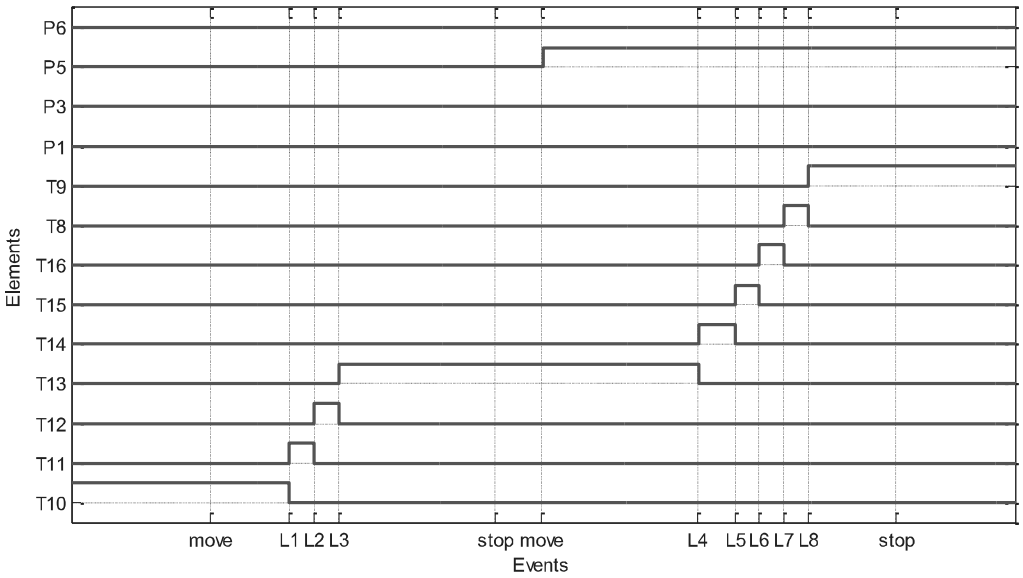
پیشامد درخواست مسیر برای قطار اول move مطابق با برنامه زمانی تولید می‌شود. این پیشامد سیستم اینترلاکینگ را برای اختصاص مسیر فعال می‌کند و پس از بررسی شرایط، سیستم اینترلاکینگ با تولید پیشامدهای محلی المان‌های موجود در مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم می‌کند (سوزن P1 در وضعیت مستقیم و سوزن P2 در وضعیت معکوس). سپس به قطار اجازه حرکت داده می‌شود و در طول سفر با عبور از هر بلاک یک پیشامد محلی تولید می‌شود که وضعیت اشغال بلاک‌ها را نمایش می‌دهد. در انتها با رسیدن قطار به موقعیت تعیین شده، پیشامد توقف قطار تولید شده و قطار متوقف می‌شود.

وضعیت المان‌های موجود در شبکه ریلی که توسط قطار دوم، وضعیت آنها تغییر می‌کند در شکل ۲٤ نمایش داده شده است. پیشامد درخواست مسیر اول move تولید می‌شود و سیستم اینترلاکینگ المان‌های مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم می‌کند (سوزن P1 و P3 در وضعیت مستقیم) و مسیر به قطار اختصاص می‌یابد. سپس به قطار اجازه حرکت داده می‌شود و قطار با عبور از بلاک‌های T11، T12 به بلاک T13 وارد می‌شود و در موقعیت تعیین شده توقف می‌کند. پس از توقف در کنار سکو پیشامد درخواست مسیر دوم تولید می‌شود و سیستم اینترلاکینگ المان‌های مسیر را در وضعیت مناسب تنظیم می‌کند (سوزن P5 در وضعیت معکوس و P3 در وضعیت مستقیم) و مسیر جدید به قطار اختصاص می‌یابد. قطار شروع به حرکت می‌کند تا به موقعیت تعیین شده در انتهای مسیر برسد و در آن‌جا متوقف می‌شود.

## ٦. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، شبیه سازی به منظور ایجاد امکان شبیه سازی برای سیستم علائم الکتریکی و اینترلاکینگ راه‌آهن طراحی شده است که تمامی قواعد ترافیکی و اینترلاکینگ را اجرا می‌کند. نوآوری این شبیه ساز، طراحی اجزاء سیستم اینترلاکینگ بر اساس دینامیک رویداد محور در محیط جعبه‌ابزار Stateflow نرم‌افزار MATLAB است که استفاده از ویژگی‌های این ابزار موجب عملکرد صحیح و بدون خطای سیستم اینترلاکینگ می‌شود و قادر به توسعه، طراحی و ارزیابی قواعد جدید در سیستم اینترلاکینگ است.

به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سیستم اینترلاکینگ برای دو شبکه ریلی طراحی شده است. در این مدل‌ها اجرای قواعد اینترلاکینگ، ارتباط با سیستم‌های کنترل ترافیک و بروز اغتشاش بررسی شده است. به منظور انجام مطالعات بعدی، پیشنهاد می‌شود که تمامی قواعد استاندارد سیستم اینترلاکینگ با دینامیک رویداد محور طراحی شود و به صورت توابع کتابخانه‌ای تولید و برای ارزیابی سیستم‌های کنترل ترافیک بکار گرفته شود.




**شکل ۲٤. وضعیت المان‌های مسیر قطار دوم**

## ۷. پی‌نوشتها

1- Signaling and Interlocking Systems
2- Discrete Event
3- Finite State Machine
4- Vienna Development Method
5- Z notation
6- Fuzzy Distributed Multi-agent
7- Intelligent multi agent railway system
8- Symbolic Analysis Laboratory
9- New Symbolic Model Checker
10- Scalability
11- Supervisory control
12- Deterministic
13- Hybrid System
14- Entry Action
15- During Action
16- Exit Action
17- On Event_Name Action
18- Exclusive (OR)
19- Parallel (AND)
20- Truth Table
21- Unlock State

## ۸. مراجع

- Cimatti, A. Giunchiglia, F. Mongardi, G. Romano, D. Torielli, F. and Traverso, P. (1998) "Formal verification of a railway interlocking system using model checking", Formal Aspects of Computing, Vol.10, No. 4, pp. 361-380.

- Hansen, K. M. (1994) "Formalising railway interlocking systems", Nordic Seminar on Dependable Computing Systems, pp. 83-94.

- Hansen, K .M. (1998) "Modelling railway interlocking systems", Department of Computer Science, Technical University of Denmark.

- Haxthausen, A. E. (2013) "Automated generation of formal safety conditions from railway interlocking tables", International Journal on Software Tools for Technology Transfer, pp. 1-14.

- Kanso, K. Moller, F. and Setzer, A. (2009) "Automated verification of signalling principles in railway interlocking systems", Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 250, No.2,pp.19-31.

- Karris, Steven T (2007) "Introduction to stateflow with applications", Orchard Publications.

- Khan, S. A. and Zafar, N. A. (2011) "Improving moving block railway system using fuzzy multi-agent specification language", International Journal of Innovative Computing Information and Control, Vol. 7, No. 78, pp. 4517-4533.

- Khan, S. A., Zafar, N. A., Ahmad, F. and Islam, S. (2014) "Extending Petri net to reduce control strategies of railway interlocking system", Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, No. 2, pp. 413-424.

- Mirabadi, A. and Yazdi, B. (2009) "Automatic generation and verification of railway interlocking control tables using FSM and NuSMV", Signal, Vol. 3, pp. m1.

-Nash, A. and Huerlimann, D. (2004) "Railroad simulation using OpenTrack", Computers in railways IX, pp. 45-54.

- Roanes-Lozano, E., Roanes-Macías, E. and Laita, L. M. (2000) "Railway interlocking systems and Gröbner bases", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 51, No. 5, pp. 473-481.

- Vanit-Anunchai, S. (2010) "Modelling railway interlocking tables using coloured petri nets", Coordination Models and Languages, pp. 137-151.

- Wang, D., Chen, X. and Huang, H. (2013) "A graph theory-based approach to route location in railway interlocking", Computers & Industrial Engineering, Vol. 66, No. 4, pp. 791-799.

- Xiangxian, C. and Yulin, H. (2011) "A component-based topology model for railway interlocking systems", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, No. 9, pp. 1892-1900.

- Zafar, N., Ahmad, Khan, S. A. and Araki, K. (2012) "Towards the safety properties of moving block railway interlocking system", Int. J. Innovative Comput., Info and Control, Vol. 8, No. 7, pp. 5677-5690.

## ۹. پیوست: ابزار Stateflow

Stateflow یک ابزار طراحی و توسعه گرافیکی برای کنترل و اجرای منطق‌های نظارتی و سلسه مراتبی است که در ارتباط با Simulink استفاده می‌شود. ابزار Stateflow می‌تواند با استفاده از تئوری ماشین‌های حالت متناهی، دیاگرام جریان و دیاگرام انتقال حالت، توصیفات مختصر و واضحی از سیستم‌های پیچیده ارایه کند [Karris, 2007]. ابزار Stateflow دارای مزایای زیر است:

– مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های راکتیو بر پایه تئوری ماشین حالت متناهی به‌صورت بصری.

– طراحی و توسعه سیستم‌های کنترل نظارتی[11] و قطعی[12].

– قابلیت مدل‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد و هیبرید.

– قابلیت ویرایش، نمایش رفتار و نتایج سیستم در هر مرحله از طراحی.

– داشتن مزیت‌هایی از یکپارچگی با محیط‌های MATLAB و Simulink برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل سیستم، نمایش و گزارش نتایج.

– قابلیت بکارگیری انواع سناریوهای شبیه‌سازی و مقایسه نتایج.

با توجه به مزایای فوق می‌توان از ابزار Stateflow به منظور طراحی سیستم‌های مبتنی بر دینامیک رویداد محور مثل سیستم‌های هیبرید[13]، رابط انسان و ماشین، سیستم‌های کنترل ترافیک و .... استفاده کرد.

### ۹-۱ اجزاء Stateflow

محیط Stateflow دارای دو بخش گرافیکی و غیرگرافیکی است که طراحی بر اساس این اجزاء انجام می‌شود. اجزای غیرگرافیکی شامل رویدادها و داده‌ها هستند که در انواع مختلف می‌توانند تعریف شده و بکار برده شوند. انواع رویدادهای موجود در Stateflow عبارتند از:

– ورودی: رویدادی که در یک بلوک Simulink رخ می‌دهد، ولی به یک چارت Stateflow انتشار می‌یابد.

– محلی: رویدادی که می‌تواند در هرجایی از چارت Stateflow رخ دهد اما تنها در سطح والدین خود (و سایر مولودهای والدین) قابل مشاهده است.

– خروجی: رویدادی که در داخل چارت Stateflow رخ می‌دهد ولی به یک بلوک Simulink انتشار می‌یابد.

رویدادهای ورودی و خروجی می‌توانند به دو صورت تریگر با لبه و Function call تعریف شوند.

Function call: از این رویداد در حالت ورودی می‌توان برای اجرا کردن چارت Stateflow و در حالت خروجی برای فعال کردن یک بلوک Simulink در طول گام زمانی فعلی از شبیه‌سازی، استفاده کرد. انواع داده‌ها هم شامل داده‌های پشتیبانی شده توسط ابزار Simulink است.

المان‌های گرافیکی در محیط Stateflow در جدول ۵ معرفی شده‌اند.

**حالت:** مدهای عملکردی سیستم‌های راکتیو را توصیف می‌کنند. از حالت‌ها برای ساخت دیاگرام‌های انتقال حالت استفاده می‌شود و دارای چهار عمل ورودی[14]، در هنگام[15]، خروجی[16] و رخ دادن یک رویدادخاص[17] است. نحوه اجرای هر عمل به صورت زیر می‌باشد:

– عمل ورودی: در زمان فعال شدن یک حالت اجرا می‌شود و با پیشوند en: یا entry: معرفی می‌شود.

– عمل در هنگام: زمانی که رویدادی رخ دهد ولی انتقال حالت صورت نگیرد اجرا می‌شود و با پیشوند du: یا during: معرفی می‌شود.

– عمل خروجی: زمانی که یک انتقال حالت رخ دهد و قبل از غیرفعال شدن حالت اجرا می‌شود و با پیشوند ex:یا exit: معرفی می‌شود.

**جدول ۵. المان‌های گرافیکی محیط Stateflow**

| اجزاء گرافیکی | انواع |
|---|---|
| «فلوچارت» | الگوهای منطق تصمیم گیری، الگوهای منطق حلقه |
| «توابع» | توابع گرافیکی، MATLAB، Stateflow، جدول صحت |
| «حالت‌ها» | حالت با ساختار موازی و انحصاری، زیرحالت و فراحالت |
| «انتقال‌ها» | انتقال پیش‌فرض، شیء به شیء، داخلی و خود حلقه |

– عمل رخ دادن یک رویداد: زمانی که یک رویداد خاص رخ دهد، اجرا می‌شود و با عبارت On Event_Name Action معرفی می‌شود.

حالت‌ها دارای دو وضعیت فعال و غیرفعال هستند که با توجه به رویدادها و شرایط می‌تواند تغییر کند و در چندین سطح سلسله مراتبی که شامل چند زیر حالت است مورد استفاده قرار بگیرند. حالت‌ها دارای دو ساختار انحصاری[18] و موازی[19] هستند که به ترتیب قابلیت اجرای مدهای عملکردی به صورت انحصاری و موازی را فراهم می‌سازد.

انتقال: انتقال یک کمان است که دو المان را به هم متصل می‌کند و عمل انتقال حالت بر اساس تعریف انتقال بین دو حالت مبدا و مقصد صورت می‌گیرد. انتقال با توجه به سطح سلسله مراتبی حالت مبدا و مقصد مرتبهبندی می‌شود. یک انتقال با برچسب خود توصیف می‌شود و قالب کلی برچسب انتقال به صورت event /transition_action{condition_action}[condition] تعریف می‌شود. عمل انتقال تنها در صورتی بررسی می‌شود که حالت مبدا فعال باشد و زمانی که رویداد event رخ دهد و شرط condition برآورده شود عمل انتقال حالت انجام می‌شود.

– event: نام رویدادی است که به واسطه رخ دادن آن و برآورده شدن شرط condition عمل انتقال حالت انجام می‌شود. در صورت تعریف نشدن با رخ دادن هر رویدادی عمل انتقال حالت انجام می‌شود.

– condition: شرطی است که بعد از رخ دادن رویداد event بررسی می‌شود و در صورت برآورده شدن عمل انتقال حالت انجام می‌شود.

– condition_action: عملی است که بلافاصله بعد از برآورده شدن شرط condition حتی در صورتی که عمل انتقال حالت هم انجام نشود اجرا می‌گردد.

– transition_action: عملی که بعد از انجام عمل انتقال حالت اجرا می‌شود.

**نقطه تصمیم‌گیری:** مسیرهای مختلفی برای یک انتقال فراهم می‌کند بطوریکه به دیاگرام Stateflow قابلیت تولید قواعد اگر– آنگاه، حلقه‌های کنترلی، ایجاد انشعاب برای انتقال حالت‌ها و ایجاد انتقال حالت بر اساس رخ دادن چند رویداد مشترک می‌دهد.

**توابع:** جعبه ابزار Stateflow دارای چهار نوع تابع است که با توجه به مدل‌سازی می‌توان از هر یک از این توابع استفاده کرد.

– تابع گرافیکی: توابع گرافیکی با استفاده از انتقال و نقطه تصمیم‌گیری برای تولید فرآیند کنترل و تولید حلقه بکار می‌رود.

– تابع Simulink: در توابع Simulink می‌توان از بلوک‌های موجود در کتابخانه نرم‌افزار MATLAB برای عمل خاصی استفاده نمود.

– تابع MATLAB: توابع MATLAB می‌توانند از توابع موجود در سایر جعبه ابزارها برای انجام عملی خاصی استفاده نمایند.

– جدول صحت[20]: از جداول صحت برای طراحی و پیاده سازی منطق ترکیبی استفاده می‌شود. جدول صحت دارای سه بخش شرط، تصمیم و عمل است.

### ۹–۲ نمایه گذاری در Stateflow

نمایه گذاری در محیط Stateflow همانند زبان C بر پایه صفر است ولی نمایه گذاری در MATLAB بر پایه یک است. یعنی درایه اول یک بردار در Stateflow با صفر مشخص می‌شود. عبارت (٦) تفاوت نمایه گذاری در MATLAB و Stateflowرا نمایش می‌دهد.

$$Stateflow: \ test[\mathrm{i}-1][\mathrm{j}-1] \qquad (٦)$$

$$MATLAB: \ test(i,j)$$

### ۹–۳ استفاده از داده‌های شمارشی

به دلیل نداشتن قابلیت استفاده از داده‌های متنی در محیط Sim-ulink از داده‌های صحیح استفاده می‌کنیم. این داده‌ها شامل چندین عدد نام گذاری شده هستند که به آن‌ها اعضای داده شمارشی گفته می‌شود. روش کار بدین صورت است که به هر عبارت مورد استفاده در محیط Simulink یا Stateflow یک عدد صحیح اختصاص می‌دهیم و نرم افزار MATLAB آن عبارت را معادل عدد اختصاص یافته در نظر می‌گیرد. یکی از کاربردهای داده‌های شمارشی استفاده به عنوان دستورات اینترلاکینگ در Stateflow است. عبارت‌های مورد استفاده برای سیستم اینترلاکینگ به صورت داده‌های شمارشی تعریف می‌شوند ودر صورت تغییر یا توسعه سیستم اینترلاکینگ می‌توان عبارت‌های دیگری نیز به عنوان دستورات اینترلاکینگ به آن اضافه نموده و یک عدد صحیح خاص به آن اختصاص دهیم.