



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling and Analysis of Preemption System for Emergency Vehicles using Timed Petri Nets

Sobhi Baniardalani ^{a,*}, Saaid Soleimani ^a

^a Department of Power and Control Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-23

Revised: 2024-11-07

Accepted: 2024-12-04

Keywords:

Emergency vichel;
Preemption system;
Timed petri net;
Intelligent traffic system;
Discrete event system.

ABSTRACT

This paper deals with the modeling and analysis of a safe and fast preemption system for the passage of emergency vichels, such as ambulances and fire engines, through intersections. This issue has become a challenging problem in recent years with the expansion of intelligent traffic systems. In this research, a method for traffic management and control of urban traffic lights is proposed, which, while reducing the stopping time of emergency vichels, ensures traffic safety and reduces congestion. For this purpose, the overall system, which includes traffic lights and emergency vehicle detection sensors, is described as a discrete event dynamic system, and temporal Petri nets are used to model the system and simulate the proposed algorithm. Petri nets are a powerful and intuitive tool for modeling and analyzing discrete event systems. By employing Timed Petri Nets (TPNs), in this article, the capabilities of the proposed algorithm, such as checking the presence of traffic jams or the possibility of accidents, are consider.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32741.2592>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: S.baniardalani@kut.ac.ir

How to cite this article:

Baniardalani, S. and Soleimani, S. (2025). Modeling and Analysis of Preemption System for Emergency Vehicles using Timed Petri Nets. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 139-156. doi: 10.22075/jme.2024.32741.2592

مدل سازی و تحلیل سامانه حق تقدم خودروهای اضطراری به کمک شبکه پتری زمانی

صبحی بنی اردلانی^{۱*}، سعید سلیمانی^۱

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲ | این مقاله به مدل سازی و تحلیل یک سامانه ایجاد حق تقدم امن و سریع برای عبور خودروهای اضطراری مانند آمبولانسها و خودروهای آتش نشانی می پردازد. این موضوع در طی سالهای اخیر و با گسترش سامانه های هوشمند ترافیک، اهمیت فراوانی یافته است. در این مقاله، روشی برای مدیریت ترافیک و کنترل چراغ های راهنمایی شهری پیشنهاد می شود که ضمن کاهش زمان توقف خودروهای اضطراری، امنیت تردد و کاهش ازدحام را نیز تضمین می کند. برای این منظور، سامانه کلی که شامل چراغ راهنمایی و ترافیک مسیر و حسگرهای تشخیص دهنده خودروهای اضطراری است، به صورت یک سیستم دینامیکی گسسته پیشنهاد می شود و از شبکه های پتری زمانی، برای مدل سازی سیستم و شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی، استفاده می شود. شبکه های پتری ابزار قدرتمند و شهودی برای مدل سازی و تحلیل سیستم های گسسته پیشنهادی هستند که در این مقاله به کمک آنها، قابلیت های الگوریتم ارائه شده از قبیل بررسی وجود قفل شدن ترافیک یا امکان بروز تصادف بررسی می شود. |
| بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷ | |
| پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴ | |
| واژگان کلیدی: | |
| خودرو اضطراری، سامانه حق تقدم، شبکه پتری زمانی، سامانه هوشمند ترافیک، سیستم گسسته پیشنهادی. | |

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32741.2592>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

(EVP) به ویژه در سامانه های ترافیک هوشمند^۴ (ITS) است [۳ و ۴]. در این سامانه ها از یک سو باید موقعیت و جهت و سرعت و مبدا و مقصد این خودروها به کمک حسگرها یا سامانه های اطلاعاتی، به درستی و به موقع تشخیص داده شوند و از سوی دیگر باید برنامه زمان بندی چراغ های راهنمایی را به صورت اضطراری تغییر داد تا مسیر برای عبور خودرو باز شده و پس از عبور خودرو، دوباره زمان بندی معمول رعایت گردد. در این فرآیند، باید تمامی اتفاقات و حالات ممکنه به صورت کامل پیش بینی شوند تا از بروز هرگونه تصادف و افزایش ازدحام غیر ضروری جلوگیری شود [۴].

در سال های اخیر، در کنار گسترش تحقیقات در زمینه ITS، موضوع حق تقدم وسایل نقلیه اضطراری نیز مورد

خودروهای اضطراری^۲ (EVs) از جمله آمبولانسها، کامیون های آتش نشانی و خودروهای پلیس وظیفه پاسخگویی به شرایط اضطراری را بر عهده دارند و نقش مهمی در نجات جان افراد و به حداقل رساندن خسارات مالی دارند. این خودروها باید در کوتاهترین زمان ممکن به مقصد برسند. آمارها نشان می دهد که اگر در ۳۰ دقیقه اول تصادف، افرادی که آسیب جدی دیده اند، نجات پیدا نکنند، شانس زنده ماندن آنها ۸۰ درصد کاهش می یابد [۱]. اگرچه بر طبق قوانین موجود همه وسایل نقلیه اضطراری مجاز به نقض قوانین متعارف مانند توقف در پشت چراغ های قرمز هستند [۲]، اما بهبود ایمنی و کارایی حمل و نقل آنها مستلزم استفاده از سامانه های حق تقدم خودرو اضطراری^۳

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.baniardalani@kut.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

استناد به این مقاله:

بنی اردلانی، صبحی و سلیمانی، سعید. (۱۴۰۴). مدل سازی و تحلیل سامانه حق تقدم خودروهای اضطراری به کمک شبکه پتری زمانی. مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (شماره ویژه ۸۱)، ۱۳۹-۱۵۶. doi: 10.22075/jme.2024.32741.2592

۲ Emergency Vichel

۳ Emergency Vichel Preemption

۴ Intelligent Traffic System

راهنمایی شهری به کار گرفته شده‌اند. در [۱۳] روش مشابهی برای مدل‌سازی سامانه EVP برای شبکه‌ای از تقاطع‌ها با چراغ‌های راهنمایی شش و هشت فاز استفاده شده است. اگرچه در این مقالات نشان داده شده که این روش مدل‌سازی، ویژگی‌هایی مانند همزمانی در سامانه را به خوبی آشکار می‌کند، اما نمودارهای حالت برخلاف شبکه‌های پتری توصیفی ریاضی و تحلیلی از سیستم ارائه نمی‌دهند. این توصیف در ارزیابی عملکرد سیستم بسیار موثر است. مرجع [۱۴] از حسگرهای متعدد و FSM برای مدیریت کنترل ترافیک استفاده می‌کند. گرچه این مقاله از یک مجموعه از حالت‌ها و گذرها استفاده می‌کند که به صورت پویا به شرایط ترافیکی بلادرنگ پاسخ می‌دهند، با این حال، موضوعاتی مانند امکان ایجاد بن بست و برگشت پذیری که از مسائل مهم در تحلیل این سیستم‌ها هستند، بررسی نشده است.

از آنجایی که شبکه‌های پتری ویژگی‌های برجسته‌ای در مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های گسسته پیشامد دارند، لذا در اکثر تحقیقات مربوط به مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل ترافیک از آنها استفاده شده است [۱۵-۱۸]. شبکه‌های پتری ابزار قوی مدل‌سازی هستند که با توجه به توانایی‌های ویژه و قابلیت مدل‌سازی شهودی و گرافیکی که دارند، از زمان معرفی توسط کارل آدام پتری تاکنون گسترش فراوان و کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. گرچه در ابتدا این شبکه‌ها فقط برای مدل‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد^۸ (DES) به کار می‌رفتند، اما در سالهای اخیر انواع خاصی از شبکه‌های پتری پیوسته برای مدل‌سازی فرآیندهای دینامیکی پیوسته نیز معرفی شده‌اند [۱۹ و ۲۰]. در همین راستا در [۲۱]، یک سامانه کنترل ترافیک شهری توسط شبکه پتری زمانی تصادفی^۹ (STPN) مدل‌سازی شده است و در [۲۲] نیز این شبکه برای جلوگیری از ازدحام ترافیک در اطراف تقاطع‌ها به کار گرفته شده است. علاوه بر این، با توسعه این کار، در [۲۳] یک ساختار مدولار برای کنترل ترافیک شهری در شبکه‌ای از تقاطع‌ها ارائه گردیده است. هم‌چنین در تجزیه و تحلیل سامانه EVP، شبکه پتری زمانی^{۱۰} (TPN) نیز به کار گرفته شده است. نمونه‌هایی از کارهای برجسته در این زمینه

توجه ویژه قرار گرفته است [۵ و ۶]. بخش قابل توجهی از این تحقیقات به توسعه روش‌های دقیق برای شناسایی و مسیریابی بهینه خودروهای اضطراری اختصاص یافته است. از جمله این روشها می‌توان به استفاده از فرستنده‌های نوری، مادون قرمز، رادیویی و صوتی برای تشخیص EVها اشاره نمود [۷ و ۸]. در [۹]، روشی برای EVP پیشنهاد شده است که با استفاده از یک شبکه مخابراتی ملی^۵، معروف به NTCIP که برای تبادل اطلاعات بین سامانه‌های حمل و نقل هوشمند طراحی شده است، مدیریت تردد خودروهای اضطراری از طریق پروتکل‌های مخابراتی امکان پذیر می‌شود. در روش ارائه شده در [۱۰]، یک سرور مرکزی مسئول مدیریت ترافیک و سامانه EVP است. در این روش هم‌چنین محاسبات مربوط به یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای وسایل نقلیه اضطراری نیز انجام می‌شود. در [۱۱] از الگوریتمی برای تخمین زمان رسیدن وسایل نقلیه اضطراری در تقاطع‌ها با جمع‌آوری اطلاعات سرعت و مسیر آنها استفاده شده است. این الگوریتم با استفاده از این داده‌ها زمان‌بندی سیگنال ترافیک را در تقاطع‌ها تنظیم می‌کند. تمام روش‌های مورد بحث در این مقالات بر وجود یک شبکه مخابراتی ملی گسترده، پیچیده و پرهزینه برای مدیریت ترافیک شهری از جمله EVP تکیه دارند. در اغلب موارد، این شبکه‌ها در دسترس نیستند، در این شرایط، روش‌های محلی مبتنی بر تجزیه و تحلیل جامع ترافیک و مدل‌سازی ترافیک هر تقاطع یا تعداد محدودی از تقاطع‌ها مناسب‌تر است. در مقاله فعلی نیز مدیریت چراغ‌های راهنمایی در هر تقاطع به صورت مستقل و بدون نیاز به شبکه مخابراتی انجام می‌شود.

یک مسئله حیاتی در سامانه‌های EVP، اطمینان از عملکرد صحیح سامانه در شرایط مختلف است. در نتیجه مدل‌سازی و تحلیل این سامانه‌ها یک گام اساسی در پیاده‌سازی آنها محسوب می‌شود. از آنجایی که چراغ‌های راهنمایی را می‌توان به عنوان سیستم‌های گسسته پیشامد در نظر گرفت، لذا برای مدل‌سازی و تحلیلی آنها نیز از ابزارهایی مانند نمودار حالت، ماشین‌های حالت محدود^۶ (FSM) و شبکه‌های پتری^۷ (PN) استفاده شده است. در [۱۲] نمودارهای حالت برای مدل‌سازی یک سامانه کنترل چراغ

⁸ Discrete Event Systems

⁹ Stochastic Timed Petri Net

¹⁰ Timed Petri Net

⁵ National Transportation Communications for Intelligent Transportation System Protocol

⁶ Finite State Machine

⁷ Petri Nets

ارسال کرد، برنامه زمان بندی چراغها به حالت معمولی باز می گردد. این الگوریتم با استفاده از TPN مدل سازی شده است و عملکرد آن برای اطمینان از برگشت پذیری و جلوگیری از بن بست با استفاده از نمودارهای دسترس پذیری ارزیابی می شود. ضمناً برای اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه سازی مدل ها توسط نرم افزار Petri.NET Simulator 2.0 انجام شده و دیگرام زمانی تغییرات چراغها ترسیم می شود. دلیل اصلی به کارگیری TPN برای مدل سازی سیستم، قابلیت مناسب این شبکه در ترجمه به کدهای برنامه نویسی کنترل کننده های برنامه پذیر^{۱۲} PLC است. در بخش ارزیابی مدل، نتیجه پیاده سازی الگوریتم بر روی PLC های زمینس نیز ارائه شده است که تطابق کامل با نتایج حاصل از شبیه سازی را نشان می دهد.

ادامه این مقاله به این صورت است: در بخش بعد مرور مختصری بر مفاهیم شبکه های پتری زمانی انجام می شود. بخش سوم، مدل سازی چراغ راهنمایی توسط TPN را در حالتی که خودرو اضطراری وجود ندارد، تشریح می کند و در بخش چهارم سناریوهای پیشنهادی برای ایجاد حق تقدم در زمان حضور EV در قالب سه سناریو بررسی می شود. در بخش پنجم نیز ارزیابی مدل و نهایتاً در بخش ششم جمع بندی نهایی و نتایج حاصله از تحقیق ارائه می شود.

۲- مروری بر شبکه های پتری

یک شبکه پتری (PN) معمولی دارای ساختاری به شکل $N = (P, T, Pre, Post, M_0)$ است که در آن: $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ مجموعه ای از m مکان است؛ $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ مجموعه ای از n گذر یا گذر است؛ $Pre: P \times T \rightarrow N$ تابع تلاقی کمانهای ورودی به گذرهاست که تعداد کمانهای هدایت شده از مکان هابه گذرها را مشخص می کند و با یک ماتریس $m \times n$ نشان داده می شود؛ $Post: P \times T \rightarrow N$ تابع تلاقی کمانهای خروجی از گذرهاست که تعداد کمانهای هدایت شده از گذرها به مکان ها را مشخص می کند و با یک ماتریس $m \times n$ نشان داده می شود؛ M_0 نشانه گذاری اولیه است.

در PN، نشانه گذاری، یک تابع مانند $M: P \rightarrow N$ است که به هر مکان یک عدد صحیح غیر منفی از نشانه ها را

عبارتند از [۲۴ و ۲۵]، که در آنها تجزیه و تحلیل کامل رفتار یک سامانه کنترل ترافیک برای سامانه EVP پیشنهادی به کمک TPN انجام شده است. مرجع [۲۶] به کمک TPN مدلی را برای مدیریت ترافیک در شبکه های شهری در هنگام تصادفات ارائه می کند که می تواند به کاهش تراکم ترافیک در مسیرهای منتهی به محل حادثه کمک کند. مراجع [۲۷ و ۲۸] نیز بر اساس شبکه های پتری رنگی زمانی، مدلی را برای کنترل ترافیک در تقاطع های پیچیده ارائه می دهند. در [۲۹]، یک مدل میکروسکوپی و سلولی برای تحلیل شبکه ترافیک، دینامیک خودروها و حرکت عابران پیاده به همراه کنترل کننده های چراغ های راهنمایی استفاده شده است. علاوه بر این، از شبکه های پتری نیز برای مدل سازی و شبیه سازی سیستم استفاده شده است. همچنین، TPN در مدل سازی تقاطع های موازی سطح راه آهن نیز کاربرد پیدا کرده است [۳۰ و ۳۱].

این مقاله به مدل سازی و تحلیل یک سامانه EVP با کمک شبکه پتری زمانی می پردازد. برای این کار، مشابه [۲۵]، TPN ها برای مدل سازی حالت های مختلف چراغ راهنمایی در حضور EV ها استفاده می شوند و نمودارهای دسترسی^{۱۱} (RG) برای ارزیابی عملکرد سیستم به کار گرفته می شوند. در [۲۵]، علاوه بر اشتباهات متعدد در مدل و گراف های دسترسی ترسیم شده یک مشکل اصلی نیز وجود دارد. در آن مقاله یک تاخیر تصادفی بین لحظه ورود خودرو اضطراری و فعال شدن سامانه EVP در نظر گرفته شده است که منجر به پیچیدگی گراف های دسترسی سیستم شده است. با توجه به این که در مقاله حاضر، تمامی حالات ممکن برای ورود خودرو در نظر گرفته می شوند، نیازی به این تاخیر تصادفی در مدل سازی وجود ندارد و لذا با حذف این تاخیر، مدل TPN سیستم ساده تر شده و در نتیجه پیچیدگی نمودارهای دسترسی حاصله بسیار کمتر می شود. این موضوع به تحلیل دقیق تر رفتار سیستم کمک زیادی می کند. در این مقاله، فرض می شود که یک حسگر، ورود EV را به تقاطع چهار طرفه با چراغ های راهنمایی دو فاز تشخیص می دهد. طبق الگوریتم پیشنهادی، با در نظر گرفتن وضعیت چراغ راهنمایی در لحظه ورود EV، زمان بندی چراغ به نحوی تغییر می کند که چراغ مسیر EV در کوتاه ترین زمان سبز شده یا سبز بماند. پس از این که حسگر خروج خودرو، سیگنال عبور خودرو از چهارراه را

¹² Programmable Logic Controller

¹¹ Reachability Graph

- **زنده بودن:** یک شبکه پتری زنده است تا زمانی که نشانه‌های مکان بتوانند فعالیت گذرها را تامین کنند و اگر این موضوع رخ ندهد، شبکه اصطلاحاً غیرزنده نامیده می‌شود که به معنی این است که سیستم متوقف شده و هیچ فعالیتی ندارد. زنده بودن شبکه‌های پتری به معنی بدون بن‌بست بودن آنها می‌باشد.

- **کراندار بودن:** در صورتیکه تعداد نشانه‌ها در هر مکان قابل دستیابی از حالت اولیه، از تعداد محدودی کمتر باشد به آن شبکه کراندار گویند.

- **برگشت پذیری:** زمانی که در روی گراف دسترسی یک شبکه بتوان برای هر حالتی، با طی حداقل یک مسیر معکوس به حالت اولیه شبکه دست پیدا کرد به آن شبکه برگشت پذیر گویند.

۳- مدل سازی چراغ راهنمایی توسط TPN

شکل (۱) نمای یک چهارراه را نشان می‌دهد. در این شکل مسیرهای حرکت به صورت شمال به جنوب (ns)، جنوب به شمال (sn)، شرق به غرب (ew) و غرب به شرق (we) مشخص شده‌اند. در هر مسیر در نقطه مشخصی یک ایستگاه گیرنده برای نصب حسگر نزدیک شدن خودرو اضطراری به چهارراه در نظر گرفته شده است که سیگنال لازم را برای سامانه کنترل چراغ راهنمایی ارسال می‌کند (مانند S_{ni} در مسیر شمال به جنوب). همچنین ایستگاه دیگری بعد از چهارراه، عبور خودرو اضطراری از چهارراه را مشخص می‌کند (مانند S_{no} در مسیر شمال به جنوب). این ایستگاه‌ها می‌توانند از فناوری‌های مختلف مانند ارتباطات رادیویی یا حسگرهای هوشمند مبتنی بر پردازش تصویر برای تشخیص خودرو اضطراری استفاده نمایند.

ضمناً فرضیات زیر در این سامانه در نظر گرفته می‌شود.

۱- چراغ راهنمایی دارای دو فاز برای کنترل حرکت خودروهاست، در نتیجه برای مسیری که چراغ آن سبز است گردش به چپ و راست نیز آزاد است.

۲- ترتیب روشن شدن چراغها در هر مسیر به صورت سبز، زرد و قرمز است.

۳- وضعیت چراغهای هر مسیر در دو قسمت کاملاً یکسان است. یعنی چراغ قرمز R_{ns} و R_{sn} همزمان با هم روشن و خاموش می‌شوند. این موضوع در مورد چراغهای سبز و زرد و همچنین در مورد چراغهای مسیر شرق-غرب نیز صادق

اختصاص می‌دهد. نشانه‌گذاری یک PN وضعیت آن را مشخص می‌کند. همچنین ماتریس W به عنوان ماتریس تلاقی گذر و مکان به صورت $W = Post - Pre$ تعریف می‌شود. برای هر گذر $t \in T$ ، مجموعه مکان‌های ورودی و خروجی آن به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$${}^{\bullet}t = \{p \in P \mid Pre(p, t) > 0\},$$

$$t^{\bullet} = \{p \in P \mid Post(p, t) > 0\}.$$

برای هر $p \in P$ نیز مجموعه گذرهای ورودی و خروجی نیز به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$${}^{\bullet}p = \{t \in T \mid Post(p, t) > 0\},$$

$$p^{\bullet} = \{t \in T \mid Pre(p, t) > 0\}.$$

شبکه‌های پتری معمولی اطلاعاتی در مورد زمان وقوع رویدادها ارائه نمی‌دهند. از این رو، شبکه‌های پتری زمانی برای رفع این کمبود استفاده می‌شوند. این شبکه‌ها زمان را به صورت قطعی یا تصادفی در نظر می‌گیرند. در دسته ای از TPNها اطلاعات زمانی به هر یک از مکان‌ها تخصیص داده می‌شود که به آنها ${}^{13}PTPN$ ، گفته می‌شود، در حالیکه در گروه دیگری از TPNها اطلاعات زمانی رویدادها به گذرها منتسب می‌شود که آنها را ${}^{14}TTPN$ می‌نامند. در این مقاله از TTPN استفاده می‌شود که از این به بعد به اختصار TPN نامیده می‌شود. در واقع شبکه پتری مورد استفاده در این مقاله شامل دو نوع گذر است: الف) گذر فوری که با زمان تاخیر صفر بوده و با میله‌های نازک نشان داده می‌شود. ب) گذرهایی با تأخیر زمانی مشخص که با نوارهای سیاه توپر نشان داده می‌شوند و تأخیرهای زمانی خاص را نشان می‌دهند.

یکی از مواردی که باعث جذابیت شبکه‌های پتری می‌شود تعادل بین قدرت مدل‌سازی و تحلیل پذیری این مدل‌ها می‌باشد. تحلیل پذیری این شبکه‌ها با خاصیت‌هایی بیان می‌شود که اهم آنها در ادامه تعریف می‌شوند.

- **قابلیت دسترسی:** شبکه‌های پتری این امکان را به مدل‌ساز می‌دهد که بدون اجرایی کردن مدل‌سازی و صرفاً با مطالعات درخت دسترسی بتواند تقدم و تاخرهای فرآیند را درک کند. این خصوصیت نشان می‌دهد که آیا همه حالت‌های موجود در شبکه پتری قابل دستیابی بوده و می‌توانند اجرا شوند یا خیر؟

¹⁴ Transition TPN

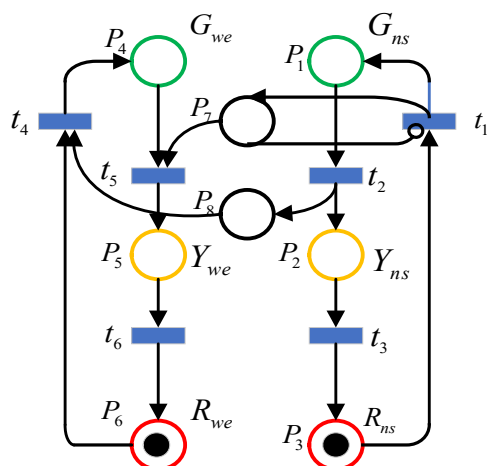
¹³ Placed TPN

۳-۱- سامانه کنترل چراغ راهنمایی در حالت عادی

شکل (۲) مدل TPN سامانه کنترل چراغ راهنمایی را در حالت عادی نشان می‌دهد.

در این مدل مکان‌های P_1 تا P_6 نشان‌دهنده‌ی روشن یا خاموش بودن چراغ‌های سبز، زرد و قرمز در هر لحظه است. مکان‌های P_7 و P_8 نشان‌دهنده‌ی شرایط کنترلی بوده و برای هماهنگی چراغ‌های دو مسیر شمال-جنوب و شرق-غرب مورد استفاده قرار می‌گیرند، به نحوی که بعد از فعال شدن گذر t_1 مکان P_7 دارای نشانه می‌شود. چون کمان رابط بین مکان P_7 و گذر t_1 از نوع سرکوبگر است، لذا امکان فعال شدن مجدد گذر t_1 وجود ندارد. تنها پس از فعال شدن گذر t_5 و انتقال نشانه از P_7 امکان شلیک مجدد t_1 وجود دارد. به این ترتیب فرض ۷ در بخش قبل تضمین می‌شود. مکان P_8 نیز برای همزمانی چراغ‌های دو مسیر به کار گرفته شده است. با شلیک گذر t_2 ، چراغ سبز مسیر شمال به جنوب خاموش می‌شود و با فعال شدن چراغ زرد این مسیر، وجود نشانه در مکان P_8 شرایط را برای سبز شدن چراغ مسیر شرق-غرب فراهم می‌کند. گذرهای t_1 تا t_6 نیز تغییرات چراغ‌ها را مشخص می‌کنند.

زمان تاخیر گذرهای t_1 و t_4 برابر ۵ ثانیه، زمان تاخیر گذرهای t_2 و t_5 برابر ۶۰ ثانیه و زمان تاخیر گذرهای t_3 و t_6 برابر ۳ ثانیه است که معادل زمان روشن بودن چراغ‌های زرد هر فاز است. ضمناً شرایط اولیه سامانه در شکل (۲) که همان روشن بودن دو چراغ قرمز است توسط نشانه گذاری اولیه در مکان‌های P_3 و P_6 مشخص گردیده است.



شکل ۲- مدل TPN چراغ راهنمایی در حالت عادی

است. این نکته مستقیماً از فرض دو فاز بودن چراغ راهنمایی حاصل می‌شود. در نتیجه در تمام این مقاله فقط مسیر ns و مسیر we در نظر گرفته می‌شود.

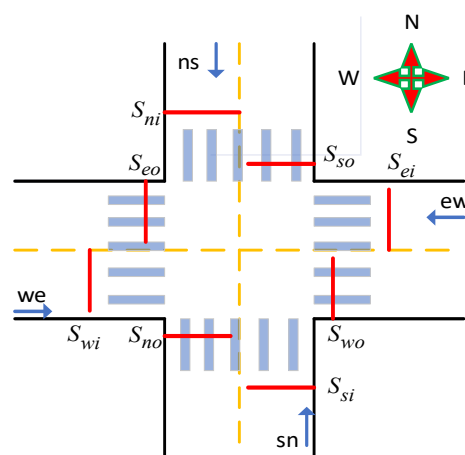
۴- زمان روشن بودن چراغ سبز ۶۰ ثانیه، چراغ زرد ۳ ثانیه و چراغ قرمز ۵ ثانیه در هر مسیر در حالت معمولی (عدم خودرو اضطراری) است.

۵- در لحظه شروع کار سامانه، چراغ قرمز هر دو مسیر به مدت ۲ ثانیه باهم روشن هستند و در پایان هر سیکل کامل چراغ (دو فاز کامل) نیز این حالت تکرار می‌شود.

۶- با ورود خودرو اضطراری و تشخیص آن توسط حسگر ورودی (مثلاً فعال شدن S_{ni} در زمان T_1)، کنترل چراغ از حالت عادی خارج شده و بر حسب وضعیت چراغ در لحظه ورود، سناریوی کنترلی به گونه‌ای تغییر می‌کند که چراغ سبز مسیر حرکت خودرو اضطراری اگر روشن است، روشن بماند یا در کوتاهترین زمان روشن شود. پس از تشخیص عبور خودرو از چهار راه (مثلاً فعال شدن S_{no} در زمان T_2)، کنترل چراغ به حالت اولیه تعریف شده برای سامانه برمی‌گردد. این حالت اولیه، حالت سبز بودن چراغ مسیر شمال به جنوب و قرمز بودن چراغ شرق به غرب است. در نظر گرفتن این فرض باعث تضمین امنیت مسیر در هر حالت می‌شود.

۷- تحت هیچ شرایطی نباید چراغ سبز مسیر شمال-جنوب و مسیر شرق-غرب با هم روشن باشند.

با توجه به این مقدمات و فرضیات، در ابتدا مدل سامانه کنترل چراغ راهنمایی در حالت عادی (بدون حضور خودرو اضطراری) ارائه می‌شود.

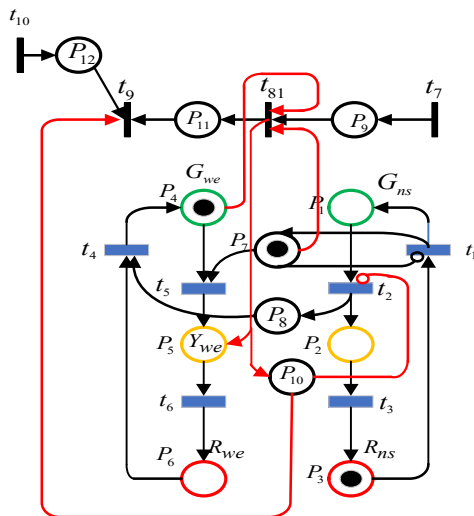


شکل ۱- نمای کلی چهارراه همراه با حسگرهای ورود و خروج خودروهای اضطراری

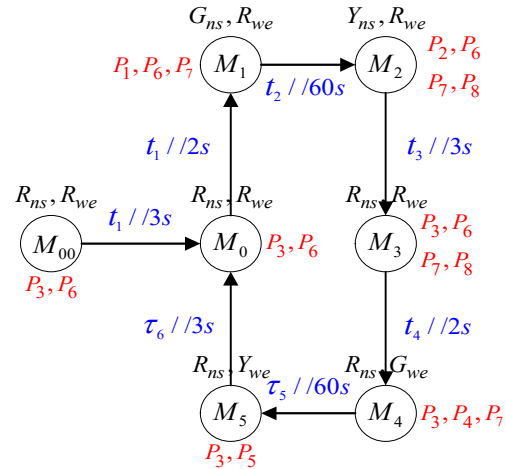
جلوگیری از بروز هرگونه برخورد خودروها در تقاطع است. بر این اساس با توجه به این که در لحظه ورود خودرو اضطراری، چراغ راهنمایی در کدام یک از حالات M_0 تا M_5 است، سه سناریو اصلی در نظر گرفته می‌شود که به نام سناریوی خیلی فوری، سناریوی فوری و سناریوی نیمه فوری شناخته می‌شوند و در ادامه بحث هریک از این سناریوها به تفصیل بررسی می‌شود.

۴-۱- سناریوی خیلی فوری

در این حالت مسیر حرکت EV عمود بر مسیر مجاز خودروها است و با توجه به وضعیت چراغ راهنمایی، سامانه باید به گونه ای کنترل شود که ضمن اجازه عبور دادن به خودرو اضطراری در کوتاه‌ترین زمان، از تصادف در چهارراه هم جلوگیری شود. ضمناً بعد از عبور خودرو EV امکان برگشت به حالت طبیعی نیز وجود داشته باشد. این حالت متناظر با زمانی است که چراغ مسیر EV قرمز بوده و چراغ مسیر مجاور (مسیر عمود بر مسیر EV) سبز است. این حالت در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است حالت چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو حالت $M_4(R_{ns}, G_{we})$ است. سناریوی طراحی شده برای این حالت بدین ترتیب است که با فعال شدن گذر t_7 که نشان‌دهنده‌ی ورود EV است، مکان P_9 دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر t_{81} عملیات تغییر زمان‌بندی چراغ راهنمایی آغاز می‌شود. این عملیات شامل مراحل زیر است که در شکل (۴) توسط کمانهای قرمز رنگ نشان داده شده اند.



شکل ۴- TPN نشان‌دهنده‌ی سناریوی خیلی فوری برای شرایط ورود خودرو اضطراری در حالت $M_4(R_{ns}, G_{we})$



شکل ۳- گراف دسترسی TPN در حالت عملکرد عادی چراغ راهنمایی

شکل (۳) گراف دسترسی این مدل را نشان می‌دهد. در این گراف کلیه حالات ممکن و زمان تغییر حالتها مشخص است. در این گراف حالتها توسط دایره‌ها مشخص شده اند. در کنار هر حالت تمامی مکان‌های دارای نشانه نوشته شده‌اند و همچنین وضعیت چراغ‌های روشن نیز مشخص است. مطابق این شکل به جز حالت M_{00} که مربوط به راه اندازی سامانه است، بقیه حالت‌ها به صورت متناوب تکرار می‌شوند. همانطور که در گراف دسترسی شکل (۳) مشخص است، چراغ راهنمایی در حالتی که خودرو اضطراری در مسیره‌ها وارد نشده است، دارای ۶ حالت اصلی M_0 تا M_5 می‌باشد که به صورت منظم تکرار می‌شود. البته حالت M_{00} نیز وجود دارد که در واقع همان حالت M_0 است که چون در اولین سیکل کاری مدت تاخیر آن ۵ ثانیه و در سیکلهای بعدی ۲ ثانیه است، برای مشخص شدن بهتر حلقه تکرار، این حالت به دو بازه زمانی ۳ ثانیه (M_{00}) و ۲ ثانیه (M_0) تفکیک شده است.

۴- سناریوهای ایجاد حق تقدم برای EV

با توجه به گراف شکل (۳) ممکن است که زمان ورود خودرو اضطراری در هریک از حالت‌های M_0 تا M_5 باشد و چون هدف اصلی این است که در هر حالت، کمترین زمان تاخیر در مسیر این خودرو ایجاد شود، لذا در هر حالت، سامانه کنترل باید بر اساس یک سناریو مشخص و احتمالاً متفاوت با سناریوهای حالات دیگر، فرمانهای لازم برای تغییر وضعیت چراغ‌ها را صادر کند. نکته اصلی که در تغییر زمان‌بندی چراغ راهنمایی باید مد نظر قرار بگیرد، علاوه بر کاهش زمان عبور خودرو از چهارراه، تضمین امنیت تردد و

البته همانگونه که قبلا هم مطرح شد، پس از این مرحله، چراغ راهنمایی وارد حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$ می شود و از آن به بعد سیکل معمولی ادامه می یابد. شکل (۵) گراف دسترسی این سناریو را همراه با گراف دسترسی حالت معمولی چراغ راهنمایی نشان می دهد. مسیر قرمز رنگ حالت های سناریوی خیلی فوری است که نهایتا به سیکل عادی چراغ راهنمایی برمی گردد.

۴-۲- سناریوی فوری

این موقعیت شامل حالت هایی است که چراغ راهنمایی مسیر حرکت EV سبز نیست و چراغ مسیر مجاور نیز قرمز است و در نتیجه تردد خودروها در مسیر عمود بر مسیر حرکت EV صورت نمی گیرد. طبیعتا تغییر زمان بندی چراغ راهنمایی نسبت به حالت خیلی فوری راحت تر است، گرچه کنترل حق تقدم باز هم باید ضمن باز کردن مسیر EV از بروز هر گونه تصادف نیز جلوگیری نماید. این موقعیت شامل دو حالت $M_2(Y_{ns}, R_{we})$ و $M_3(R_{ns}, R_{we})$ در لحظه ورود EV می شود که برای هر دو یک سناریو مطابق شکل (۶) طراحی شده است. در این سناریو، با فعال شدن گذر t_7 که نشان دهنده ورود EV است، مکان P_9 دارای نشانه می شود و سپس با فعال شدن گذر t_{82} سامانه کنترل حق تقدم EV که با کمانهای قرمز رنگ در شکل مشخص شده اند، فعال می شود.

این عملیات برای شکل (۶-الف) شامل مراحل زیر است. (در این موقعیت، حالت اولیه چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو حالت $M_2(Y_{ns}, R_{we})$ است).

۱- مکان P_7 بدون نشانه می شود. با این کار شرایط برای روشن شدن G_{ns} فراهم می شود تا مسیر حرکت EV باز شود.

۲- مکان P_8 بدون نشانه می شود. با این کار امکان سبز شدن G_{we} از بین می رود و تردد در مسیر غرب به شرق همچنان متوقف می ماند.

۳- با وجود نشانه در P_{10} ، از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می شود. در نتیجه این تغییرات تنها گذر فعال t_3 خواهد بود که با تاخیر τ بعد از شلیک t_{82} ، شلیک می شود. از آنجا که مدت زمان تاخیر t_3 حداکثر ۳ ثانیه است، بنابراین $0 \leq \tau \leq 3$.

۴- مکان P_{11} دارای نشانه می شود که نشان دهنده فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.

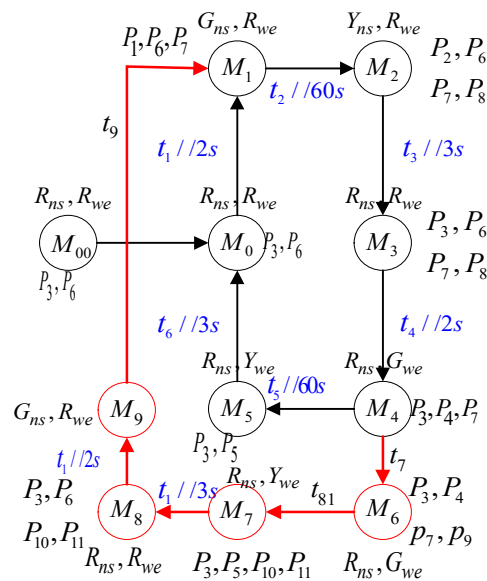
۱- مکان P_4 بدون نشانه می شود. با این کار، G_{we} دیگر در شرایط سبز نیست.

۲- مکان P_7 بدون نشانه می شود. با این کار، زمینه برای سبز شدن G_{ns} فراهم می شود.

۳- مکان P_{10} نشانه دار می شود که در نتیجه از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می شود.

۴- مکان P_5 نشانه دار می شود که در نتیجه چراغ زرد Y_{we} روشن شده و شرایط برای قرمز شدن R_{we} فراهم می شود. در نتیجه ای این تغییرات گذرهای t_6 و t_1 فعال خواهند شد. t_6 پس از ۳ ثانیه شلیک شده و در نتیجه R_{we} دارای نشانه می شود که به معنی فعال شدن چراغ قرمز مسیر عمود بر حرکت EV است و ۲ ثانیه بعد t_1 شلیک می شود که باعث سبز شدن G_{ns} شده و مسیر EV باز می شود.

۵- مکان P_{11} دارای نشانه می شود که نشان دهنده فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.



شکل ۵- گراف دسترسی سناریوی خیلی فوری همراه با گراف دسترسی حالت معمولی چراغ راهنمایی

پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه دار می شود. با توجه به نشانه دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_9 فراهم می گردد. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می شود. ضمنا مکان P_{11} نیز بدون نشانه می شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است.

شود.

۲- مکان P_8 بدون نشانه می‌شود. با این کار امکان سبز شدن G_{we} از بین می‌رود و تردد در مسیر غرب به شرق همچنان متوقف می‌ماند.

۳- با وجود نشانه در P_{10} ، از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می‌شود. در نتیجه این تغییرات تنها گذر فعال t_1 خواهد بود که ۵ ثانیه بعد از شلیک t_{82} ، شلیک می‌شود.

۴- مکان P_{11} دارای نشانه می‌شود که نشان‌دهنده‌ی فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.

۵- با شلیک t_1 ، مکان G_{ns} فعال می‌شود. یعنی چراغ سبز مسیر حرکت EV فعال می‌شود.

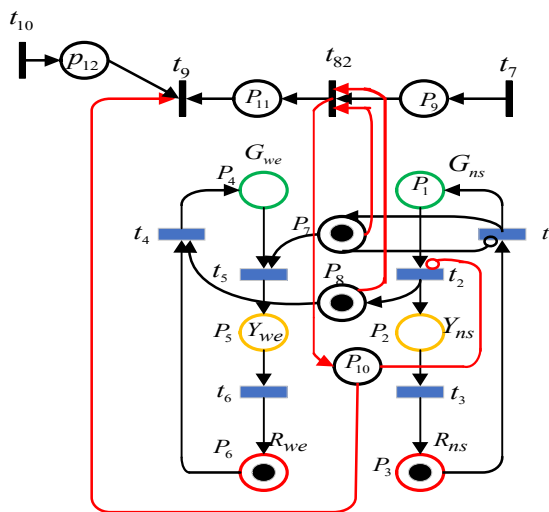
پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_9 فراهم می‌گردد. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می‌شود. ضمناً مکان P_{11} نیز بدون نشانه می‌شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است. شکل (۷) گراف دسترسی این سناریو را همراه با گراف دسترسی حالت معمولی چراغ راهنمایی برای دو حالت اخیر نشان می‌دهد. مسیر قرمز رنگ، بیانگر حالت‌های سناریو ۲ است که نهایتاً به سیکل عادی چراغ راهنمایی برمی‌گردد

۵- با شلیک t_3 ، مکان R_{ns} فعال می‌شود. یعنی چراغ قرمز مسیر حرکت EV فعال می‌شود. دلیل این موضوع لزوم رعایت ترتیب تغییر چراغ‌ها از سبز به زرد، قرمز و مجدداً سبز است که به عنوان یک قانون در بخش قبل مورد تأکید قرار گرفت.

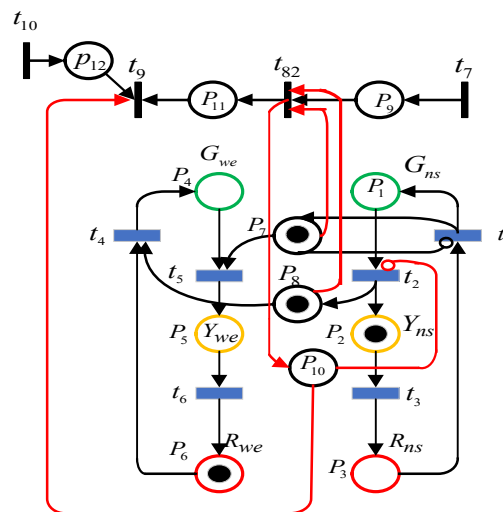
۶- پس از ۵ ثانیه t_1 شلیک می‌شود که باعث سبز شدن G_{ns} شده و مسیر EV باز می‌شود.

پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_9 فراهم می‌گردد. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می‌شود. ضمناً مکان P_{11} نیز بدون نشانه می‌شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است. شکل (۶-ب) نیز سناریو فوری را برای شرایطی نشان می‌دهد که حالت اولیه چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو حالت $M_3(R_{ns}, R_{we})$ است. در این سناریو، با فعال شدن گذر t_7 که نشان‌دهنده‌ی ورود EV است، مکان P_9 دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر t_{82} سامانه کنترل حق تقدم EV که با کمانهای قرمز رنگ در شکل مشخص شده‌اند، فعال می‌شود. مراحل عملیات در این حالت به ترتیب زیر است.

۱- مکان P_7 بدون نشانه می‌شود. با این کار، شرایط برای روشن شدن G_{ns} فراهم می‌شود تا مسیر حرکت EV باز

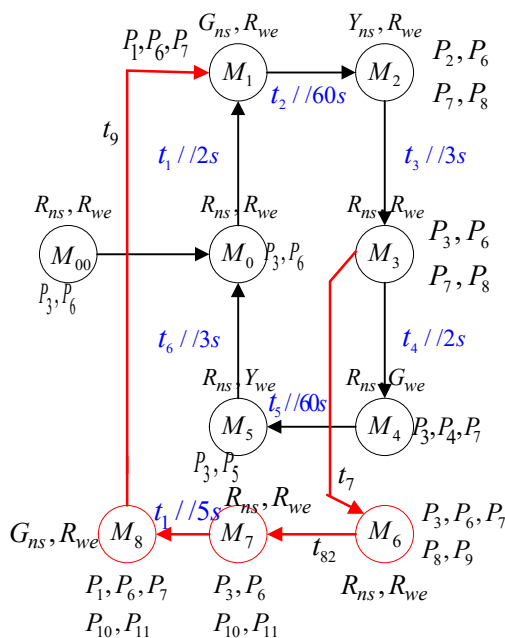


ب- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_3(R_{ns}, R_{we})$

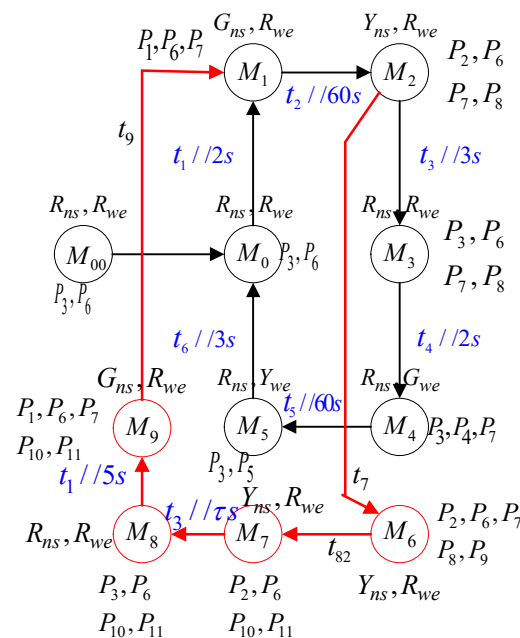


الف- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_2(Y_{ns}, R_{we})$

شکل ۶- TPN نشان‌دهنده‌ی سناریوی فوری



ب- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_3(R_{ns}, R_{we})$



الف- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_2(Y_{ns}, R_{we})$

شکل ۷- گرافهای دسترسی برای سناریوی فوری

۴-۳- سناریوی نیمه فوری

این موقعیت شامل حالتهایی است که در زمان ورود EV، چراغ راهنمایی در حالتهای $M_0(R_{ns}, R_{we})$ ، $M_1(G_{ns}, R_{we})$ و $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ است. از این رو به این موقعیت، نیمه فوری گفته می‌شود که در این سه حالت چراغ مسیر EV یا سبز است (حالت آخر) و یا تغییرات چراغ راهنمایی به صورتی است که چراغ مسیر عمود بر مسیر EV از حالت سبز خارج شده و چراغ مسیر EV به زودی سبز خواهد شد (۲ حالت اول). در نتیجه برای این سه حالت با طراحی یک سناریوی مشترک (سناریو ۳) که کمترین تغییرات در سامانه کنترل چراغ راهنمایی را ایجاد می‌کند، می‌توان حق تقدم را برای خودرو اضطراری ایجاد نمود. شکل (۸) مدل TPN این سناریو را برای سه حالت گفته شده نشان می‌دهد.

سناریو نیمه فوری برای حالت $M_0(R_{ns}, R_{we})$

در این حالت، با فعال شدن گذر t_7 که نشان‌دهنده‌ی ورود EV است، مکان P_9 دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر t_{83} سامانه کنترل حق تقدم EV که با کمانهای قرمز رنگ در شکل مشخص شده‌اند، فعال می‌شود. این عملیات برای شکل ۸-الف شامل مراحل زیر است. (در این

موقعیت، حالت اولیه چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو

حالت $M_0(R_{ns}, R_{we})$ است.

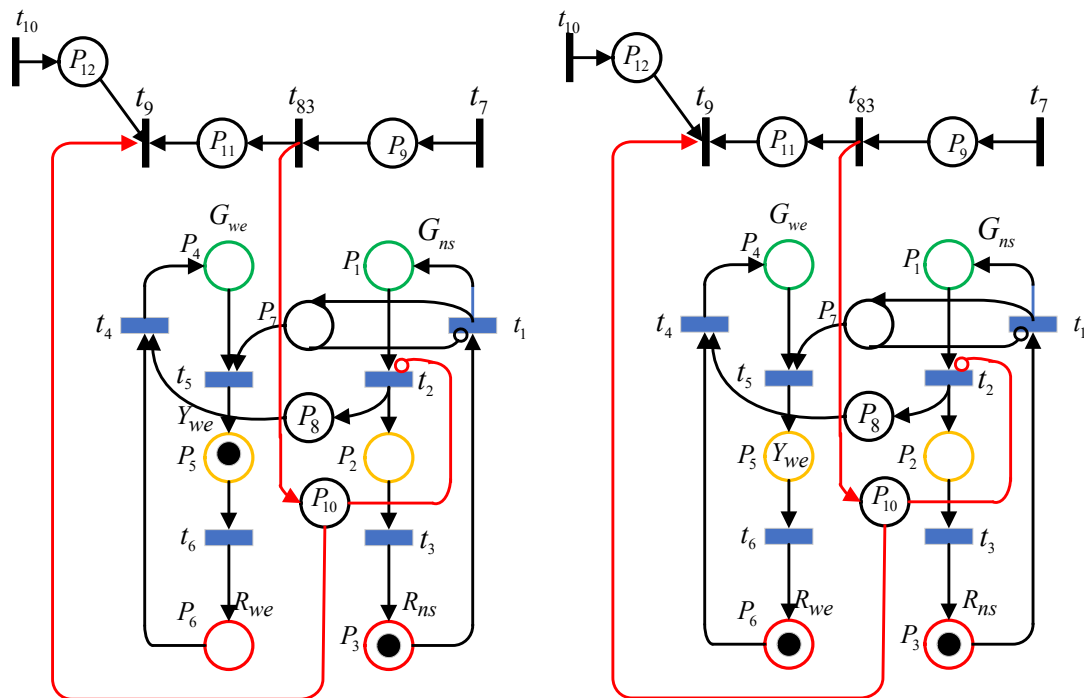
۱- با وجود نشانه در P_{10} ، از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می‌شود.

۲- مکان P_{11} دارای نشانه می‌شود که نشان‌دهنده‌ی فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.

۳- در نتیجه این تغییرات تنها گذر فعال t_1 خواهد بود که با تاخیر τ بعد از شلیک t_{82} ، شلیک می‌شود. از آنجا که مدت زمان حالت $M_0(R_{ns}, R_{we})$ $2t_1$ ثانیه است، بنابراین $0 \leq \tau \leq 2s$ خواهد بود.

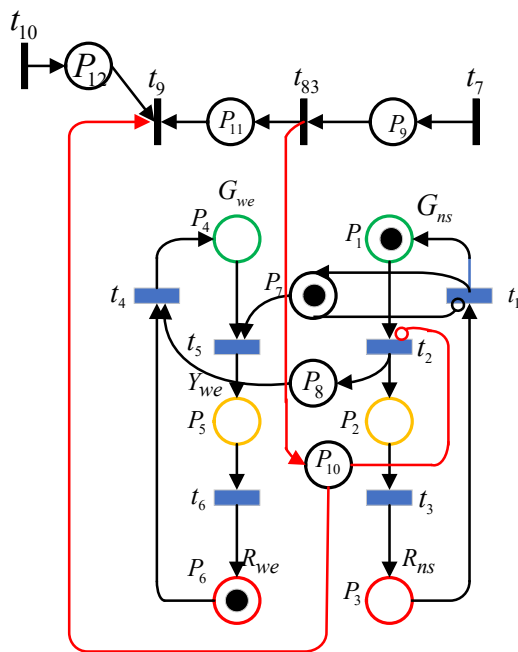
۴- با شلیک t_1 ، مکان G_{ns} فعال می‌شود. یعنی چراغ سبز مسیر حرکت EV فعال می‌شود.

پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_9 فراهم می‌گردد. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می‌شود. ضمناً مکان P_{11} نیز بدون نشانه می‌شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است.



الف- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_0(R_{ns}, R_{we})$

ب- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_5(R_{ns}, Y_{we})$



ج- ورود خودرو اضطراری در حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$

شکل ۸- TPN نشان‌دهنده سناریوی نیمه فوری

ورود EV است، مکان P_9 دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر t_{83} سامانه کنترل حق تقدم EV فعال می‌شود. این عملیات برای شکل (۸-ب) شامل مراحل زیر است. (در این موقعیت، حالت اولیه چراغ راهنمایی در

گراف دسترسی این TPN در شکل (۹-الف) ترسیم شده است.

- سناریو نیمه فوری برای حالت $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ در این حالت نیز، با فعال شدن گذر t_7 که نشان‌دهنده

۲- مکان P_{11} دارای نشانه می‌شود که نشان‌دهنده‌ی فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.

۳- در نتیجه‌ی این تغییرات هیچ گذری فعال نیست. تنها گذری که می‌تواند فعال شود، گذر t_6 خواهد بود که پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_6 فراهم می‌گردد. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می‌شود. ضمناً مکان P_{11} نیز بدون نشانه می‌شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است. البته همانگونه که قبلاً هم مطرح شد، پس از این مرحله، چراغ راهنمایی وارد حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$ می‌شود و از آن به بعد سیکل معمولی ادامه می‌یابد. گراف دسترسی این TPN در شکل (۹-ج) ترسیم شده است.

۴-۴- جمع‌بندی مدلهای پیشنهادی: با توجه به گرافهای دسترسی ترسیم شده برای حالت‌های مختلف نتایج زیر قابل مشاهده است.

۱- سامانه EVP تمام حالت‌های ممکن برای ورود EV را پوشش می‌دهد. همانطور که در بخش ۳-۱ اشاره شد، چراغ راهنمایی در حالت بدون EV دارای شش حالت مختلف است که به صورت منظم تکرار می‌شوند. در این بخش برای ورود EV در هریک از این حالت‌ها، یک سناریو پیش بینی شد که در نتیجه تمامی حالت‌های ممکن برای لحظه ورود EV را پوشش می‌دهد و بنابراین سامانه پیشنهادی یک سامانه جامع است.

۲- با توجه به گراف دسترسی ترسیم شده برای حالت عدم ورود EV و حالت‌های مختلف ورود EV می‌توان مشاهده نمود که تمامی گرافها برگشت پذیر و زنده هستند. یعنی از هر حالت که سامانه شروع به کار کند، بعد از گذشت چند حالت محدود، سیکل چراغ راهنمایی تکرار شده و هیچگاه به حالت بن‌بست نمی‌رسد.

۳- در تمامی سناریوها ضمن تضمین عبور EV در کوتاهترین زمان ممکن، هیچگونه برخورد و تصادفی پیش نمی‌آید و از اینرو سامانه EVP پیشنهادی، کاملاً امن است.

لحظه ورود خودرو حالت $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ است.

۱- با وجود نشانه در P_{10} ، از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می‌شود.

۲- مکان P_{11} دارای نشانه می‌شود که نشان‌دهنده‌ی فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.

۳- در نتیجه این تغییرات گذرهای فعال t_6 و t_1 خواهند بود که t_6 با ۳ ثانیه تاخیر نسبت به t_5 شلیک شده و با تاخیر τ بعد از شلیک t_6 شلیک می‌شود. از آنجا که مدت زمان تاخیر t_6 حداکثر ۳ ثانیه است، بنابراین $0 \leq \tau \leq 3$.

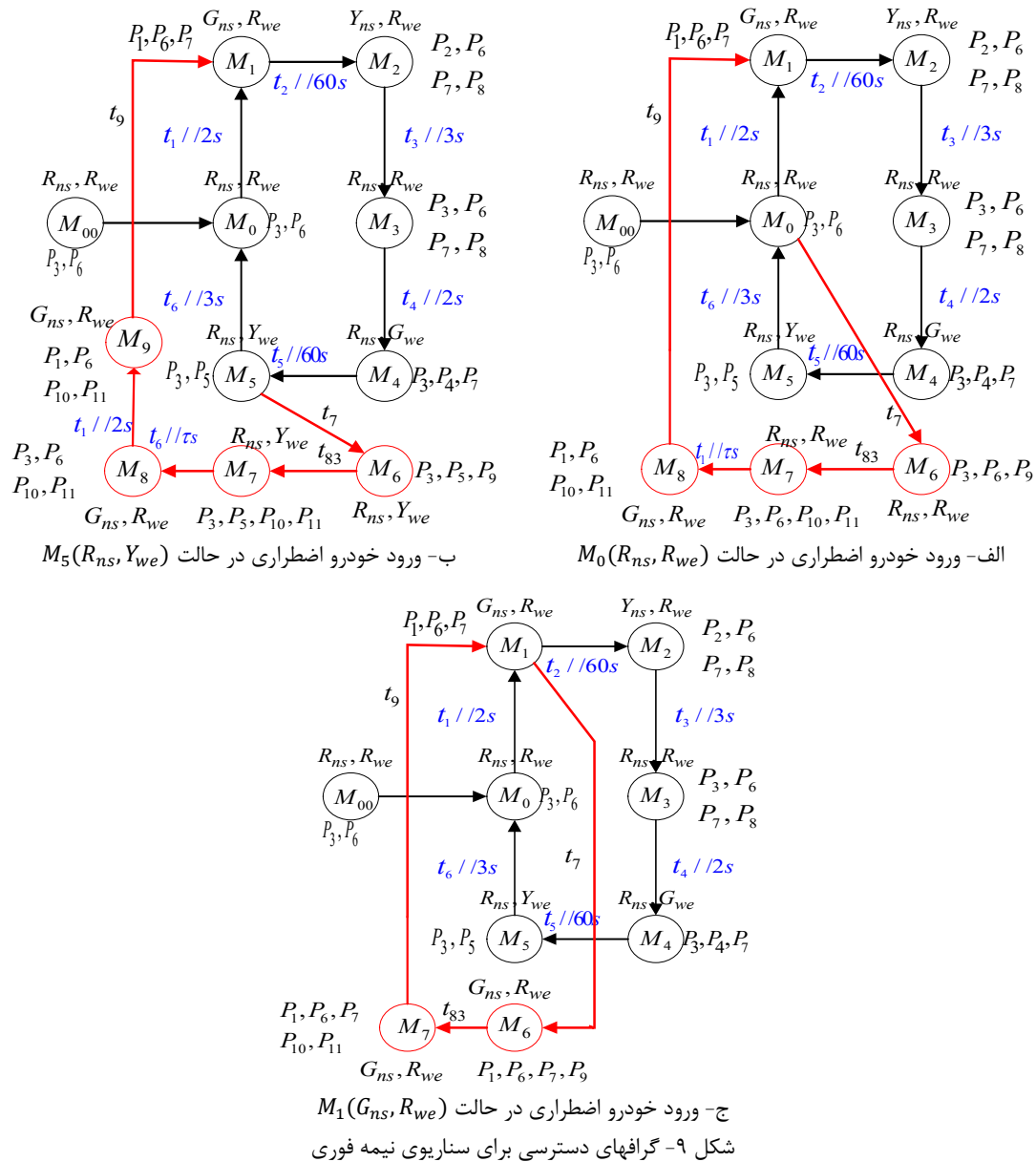
در نتیجه R_{we} دارای نشانه می‌شود که به معنی فعال شدن چراغ قرمز مسیر عمود بر حرکت EV است و ۲ ثانیه بعد t_1 شلیک می‌شود که باعث سبز شدن G_{ns} شده و مسیر EV باز می‌شود.

پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_{10} فعال شده و مکان P_{12} نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن P_{11} شرایط برای شلیک t_6 فراهم می‌گردد. پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر S_{no} گذر t_6 شلیک می‌شود. در نتیجه مکان P_{10} بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای فعال شدن t_2 آماده می‌شود. ضمناً مکان P_{11} نیز بدون نشانه می‌شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم EV و برگشت وضعیت چراغ راهنمایی به حالت عادی است. البته همانگونه که قبلاً هم مطرح شد، پس از این مرحله، چراغ راهنمایی وارد حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$ می‌شود و از آن به بعد سیکل معمولی ادامه می‌یابد. گراف دسترسی این TPN در شکل (۹-ب) ترسیم شده است.

-سناریو نیمه فوری برای حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$

در این حالت نیز با فعال شدن گذر t_7 که نشان‌دهنده‌ی ورود EV است، مکان P_0 دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر t_{g3} سامانه کنترل حق تقدم EV فعال می‌شود. این عملیات برای شکل (۸-ج) شامل مراحل زیر است. (در این موقعیت، حالت اولیه چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو حالت $M_1(G_{ns}, R_{we})$ است).

۱- با وجود نشانه در P_{10} ، از تغییر حالت G_{ns} (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می‌شود.



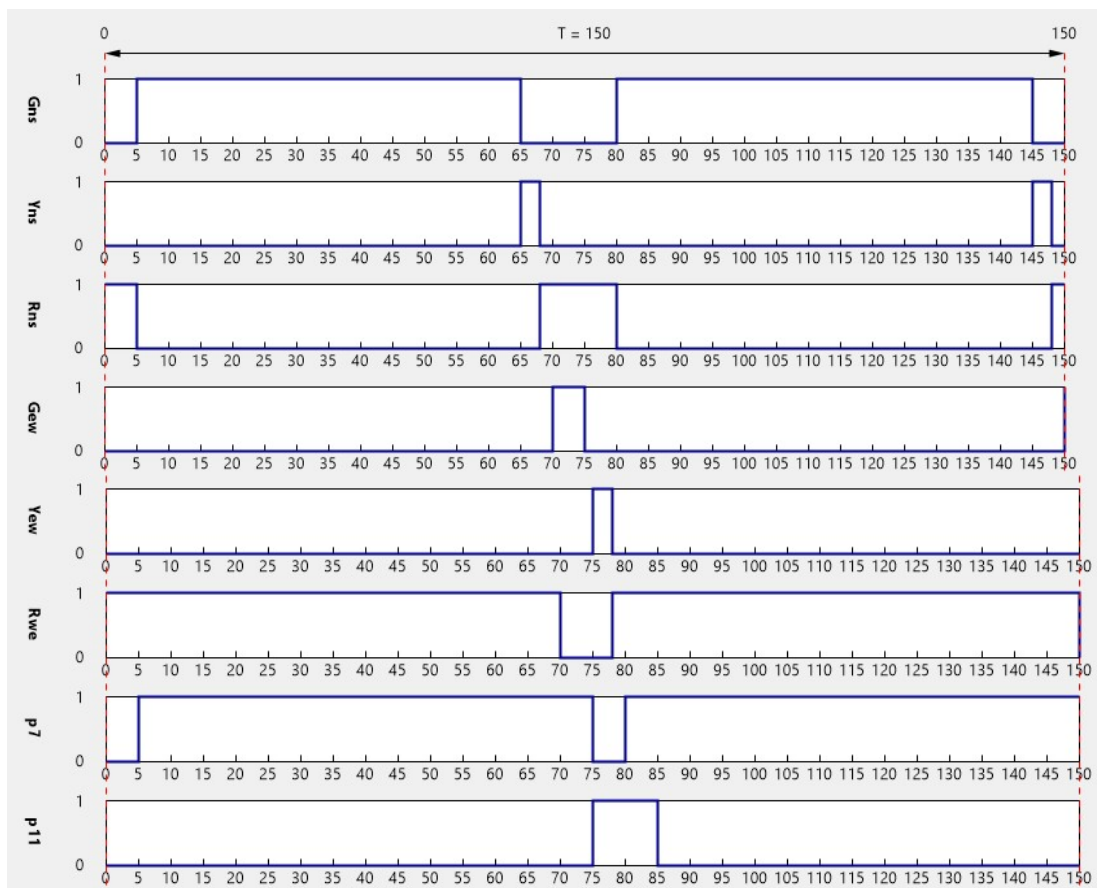
۵- ارزیابی مدل

ارزیابی مدل پیشنهادی و اطمینان از صحت عملکرد و کارایی آن بخش مهمی از تحقیق است. برای این کار در ابتدا پارامترهای موثر در کارایی سیستم، مشخص می‌شوند و سپس به کمک نرم‌افزارهای شبیه ساز، شبکه پتری که برای مدل‌سازی سیستم پیشنهاد شده است، پیاده و شبیه سازی می‌شود. در نهایت پارامترهای کارایی سیستم که به صورت واقعی اندازه گیری شده‌اند با پارامترهای کارایی مدل که در فرآیند شبیه‌سازی محاسبه شده‌اند مقایسه می‌شوند

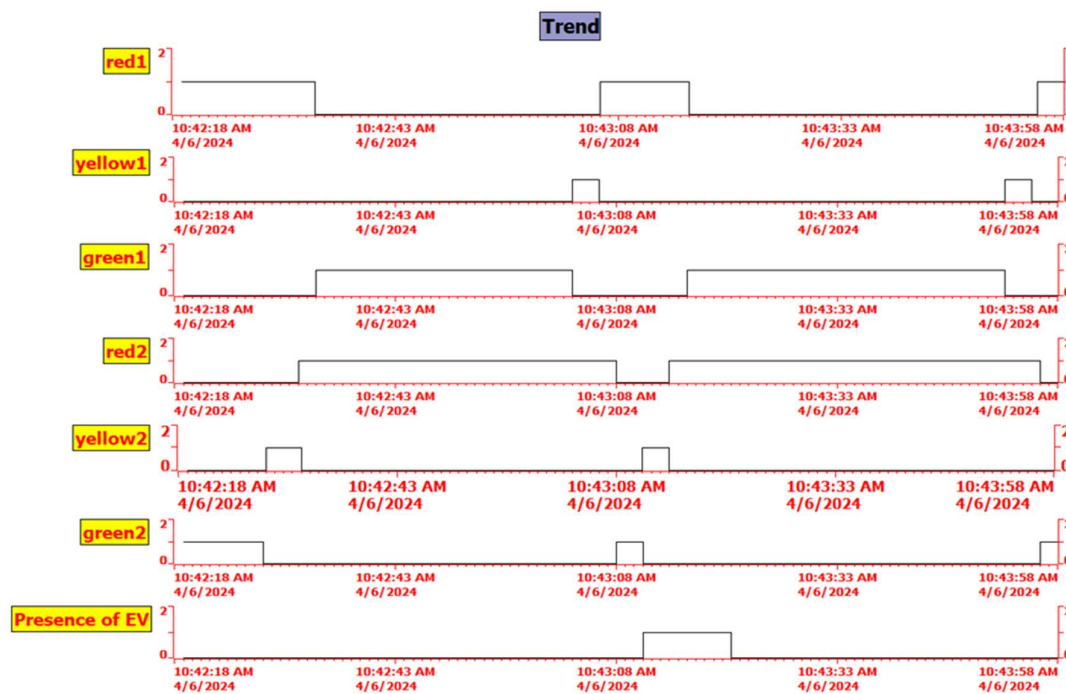
تا کارایی مدل پیشنهادی مشخص شود. به عنوان مثال در مراجع [۳۲ و ۳۳] بررسی کارایی شبکه‌های تلفن همراه در حالت وجود حملات سایبری از طریق مدل‌سازی آنها توسط شبکه پتری تصادفی انجام شده است [۳۴]. همچنین در [۳۵] یک مدل تحلیلی بر اساس شبکه پتری تصادفی تعمیم یافته^{۱۵} (GSPN) برای ارزیابی مصرف انرژی گره‌ها در یک شبکه حسگر بی سیم مبتنی بر پروتکل S-MAC^{۱۶} ارائه شده است. شبکه پتری ارائه شده، در نرم افزار PIPE پیاده سازی شده و با اعمال محاسبات ریاضی، انرژی مصرفی به کمک خروجی‌های مدل محاسبه شده است.

^{۱۵} Generalized Stochastic Petri Net (GSPN)

^{۱۶} Sensor-Media Access Control



شکل ۱۰- نمودار تغییرات زمانی چراغ راهنمایی و مکانهای TPN برای سناریوی خیلی فوری



شکل ۱۱- نمودار تغییرات زمانی چراغ راهنمایی برای سناریوی خیلی فوری

محدودیت صفحات مقاله، امکان ارائه همه گراف‌های زمانی وجود ندارد.

همچنین جهت ارزیابی بهتر الگوریتم‌های پیشنهادی و بررسی قابلیت اجرای عملی آنها TPN‌های مطرح شده در مقاله به کدهای STL^{17} که از معروف‌ترین زبان‌های برنامه‌نویسی برای کنترل کننده‌های قابل برنامه‌ریزی^{۱۸} (PLC) است ترجمه شده و سپس بر روی PLC S7-300 زیمنس اجرا گردید. برای مانیتورینگ سیستم و ترسیم دیاگرام‌های زمانی وضعیت چراغ‌ها نیز از نرم‌افزار Siemens WinCC flexible 2008 sp5 استفاده شده است. شکل (۱۱) نشان‌دهنده دیاگرام زمانی تغییرات چراغ‌های راهنمایی در حالت سناریوی خیلی فوری است. در این شکل چراغ‌هایی که با شماره ۱ مشخص شده‌اند همان چراغ‌های مسیر شمال-جنوب و چراغ‌های شماره ۲، چراغ‌های شرق به غرب هستند. ضمناً برای ترسیم بهتر دیاگرام زمانی، زمان چراغ سبز از ۶۰ ثانیه در شبیه‌سازی TPN به ۳۰ ثانیه کاهش یافته‌است. از مقایسه شکل (۱۰) و (۱۱) می‌توان انطباق ترتیب زمانی وقایع و درستی انجام الگوریتم پیشنهادی را در حالت شبیه‌سازی و حالت عملی به درستی مشاهده نمود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک سامانه EVP برای یک چراغ راهنمایی کنترل ترافیک پیشنهاد شد. اساس عملکرد الگوریتم ارائه شده بر این موضوع استوار است که پس از تشخیص ورود EV سامانه کنترل، زمان بندی چراغ‌ها را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که چراغ سبز واقع در مسیر EV یا تا عبور EV از چهارراه سبز می‌ماند و یا در کوتاه‌ترین زمان ممکن برای عبور EV سبز می‌شود. با مدل‌سازی سامانه توسط TPN و ترسیم گراف دسترسی آنها در کلیه حالات ورود EV می‌توان مشاهده نمود که الگوریتم پیشنهادی ضمن تضمین عبور ایمن EV از چهارراه در کوتاه‌ترین زمان، بعد از گذشت چند حالت محدود، سیکل چراغ راهنمایی را به حالت معمولی برمی‌گرداند و هیچگاه به حالت بن‌بست نمی‌رسد. شبیه‌سازی سامانه EVP پیشنهادی توسط TNP صحت عملکرد و جامعیت آن را نشان داد. ضمناً پیاده‌سازی این سامانه بر روی PLC قابلیت اجرای آن را بر روی یک سامانه واقعی نشان می‌دهد.

در مقالات گفته شده مدلهای مورد بررسی ماهیت تصادفی دارند، اما در مقاله حاضر سیستم مورد بررسی یک سیستم زمانی و قطعی است لذا برای ارزیابی مدل، زمان‌های روشن بودن چراغها و توالی آنها به عنوان پارامترهای اصلی برای ارزیابی مدل در نظر گرفته می‌شوند. مدل‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار Petri.NET Simulator 2.0 [۳۶] شبیه سازی شده و دیاگرام زمانی تغییرات مکانهای متناظر با چراغ‌ها ترسیم شده‌است. در شکل (۱۰) نمودار تغییرات زمانی چراغ راهنمایی و مکان‌های TPN برای سناریوی خیلی فوری که توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی به دست آمده، ترسیم شده است. این نمودار برای حالتی ترسیم شده که EV در لحظه ۷۵ ثانیه توسط حسگر ورودی شناسایی شده است. در این لحظه چراغ راهنمایی در حالت $M_4(R_{NS}, G_{We})$ است. همانطور که در نمودار مشخص است با فعال شدن سامانه حق تقدم EV در همین لحظه چراغ G_{We} خاموش شده و چراغ زرد همین مسیر یعنی Y_{We} روشن می‌شود تا پس از گذشت ۳ ثانیه چراغ قرمز این مسیر یعنی Y_{We} روشن شود. به این ترتیب با ایجاد فرصت برای تخلیه چهارراه از خودروهای مسیر غرب به شرق زمینه برای سبز شدن چراغ مسیر شمال به جنوب فراهم می‌شود، ضمن این که امکان هرگونه برخورد نیز از بین می‌رود. البته همانگونه که در بخش قبل نیز مطرح شد به مدت ۲ ثانیه هردو چراغ قرمز روشن هستند که کاملاً تردد خودروهای مسیر غرب به شرق متوقف شود و سپس چراغ G_{NS} روشن می‌شود

پس از عبور EV از چهارراه که در اینجا در لحظه ۸۵ ثانیه انجام می‌شود، مکان P_{11} غیر فعال می‌شود که نشان‌دهنده پایان کار سامانه حق تقدم EV است. از این لحظه به بعد چراغ وارد سیکل معمولی خود و حالت $M_1(G_{NS}, R_{We})$ می‌شود که در آن چراغ مسیر شمال-جنوب به مدت ۶۰ ثانیه روشن است و سپس در لحظه ۱۴۵ ثانیه خاموش می‌شود.

همانطور که ملاحظه می‌شود زمان بندی حاصل از شبیه‌سازی مدل‌ها دقیقاً متناظر با زمان بندی واقعی سامانه و توالی روشن و خاموش شدن چراغها و پیشامدها منطبق بر گراف دسترسی حالات شکل (۵) است. این شبیه‌سازی برای تمام سناریوها انجام شده و تطابق کامل بین سامانه واقعی و مدل‌های پیشنهادی مشاهده می‌شود که به دلیل

¹⁸ Programmable Logic Controller

¹⁷ Statement List

تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

صبحی بنی اردلانی: نویسنده مسئول و استاد راهنمای پایان نامه مرتبط با مقاله.

سعید سلیمانی: نویسنده همکار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه صنعتی کرمانشاه.

منابع مالی

منابع مالی مورد استفاده جهت انجام پژوهش و نگارش مقاله توسط دانشگاه صنعتی کرمانشاه تامین شده است.

جهت ادامه و توسعه تحقیق در این زمینه می‌توان موضوع پیاده سازی سامانه پیشنهادی توسط PLCها و چگونگی ترجمه TPN به کد STL را مد نظر قرار داد. هم‌چنین بهینه‌سازی سامانه فعلی هم موضوع چالشی است که می‌توان با در نظر گرفتن زمان‌های تاخیر مناسب یا انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب حسگرهای ورود EV، زمان چراغ قرمز اضافی برای مسیر عمود بر مسیر EV را به حداقل رساند.

تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۱۴۱۷/ص/پ/ط با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی کرمانشاه انجام شده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله

مراجع

- [1] L. Lu, and S. Wang. "Literature Review of Analytical Models on Emergency Vehicle Service: Location, Dispatching, Routing and Preemption Control." In 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Auckland, New Zealand, 3031–3036. 2019.
- [2] P. Koonce et al. Signal Timing Manual. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2008.
- [3] W. Yu, W. Bai, W. Luan, and L. Qi. "State-of-the-Art Review on Traffic Control Strategies for Emergency Vehicle." IEEE Access 10 (2022): 109729–109742.
- [4] K.S. Jeevan, and M.R. Kounte. "A Survey on Emergency Vehicle Preemption Methods Based on Routing and Scheduling." *International Journal of Computer Networks and Applications* 9, no. 1 (2022): 60–71.
- [5] N. Zhang, F.Y. Wang, F. Zhu, and D. Zhao. "DynaCAS: Computational Experiments and Decision Support for ITS." *IEEE Intelligent Systems* 23, no. 6 (Nov./Dec. 2008): 19–23.
- [6] F.Y. Wang. "Toward a Revolution in Transportation Operations: AI for Complex Systems." *IEEE Intelligent Systems* 23, no. 6 (Nov./Dec. 2008): 8–13.
- [7] R. Kamalanathsharma, and H. Kathleen. "Traffic Signal Preemption for Emergency Vehicle." U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2006.
- [8] O. Karpis. "System for Vehicle Classification and Emergency Vehicle Detection." *IFAC Proceedings Volumes* 45, no. 7 (2012): 186–190.
- [9] K.H. Chen, C.R. Dow, C.W. Yang, and W.C. Chiang. "BEVOR: An NTCIP-Based Interoperable Framework for Emergency Vehicle Preemption System Using Web Service and STMF." *Journal of Information Science and Engineering* 26 (2010): 801–815.
- [10] C.M. Huang, C.C. Yang, C.Y. Tseng, and C.H. Chou. "A Centralized Traffic Control Mechanism for Evacuation of Emergency Vehicle Using the DSRC Protocol." In Proc. ISWPC, 2009, 1–5.
- [11] G. Unibaso, J.D. Ser, S. Gil-Lopez, and B. Molinete. "A Novel CAM Based Traffic Light Preemption Algorithm for Efficient Guidance of Emergency Vehicle." In Proc. IEEE Annu. Conf. Intell. Trans. Syst., Funchal, Portugal, 74–79, Sep. 2010.
- [12] Y. Huang. "Design of Traffic Light Control Systems Using Statecharts." *The Computer Journal* 49, no. 6 (Nov. 2006): 634–649.

- [13] Y.S. Weng, Y.S. Huang, S.F. Su, and C.S. Yu. "Modeling of Emergency Vehicle Preemption Systems Using Statecharts." In 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Anchorage, AK, USA, 556–561.
- [14] M. Sakthimohan et al. "FSM Based Coordinated Four-Way Intersection Specific Automated Traffic Light Controller." In 2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, 1726–1731.
- [15] Y. Wei, H. Ning, Y. An, N. Wu, and X. Zhao. "Design of Safety Petri Net Controllers for Deadlock Prevention at a Class of Road Intersections." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 24, no. 12 (Dec. 2023): 14453–14466.
- [16] B. Xin et al. "Simultaneous Scheduling of Processing Machines and Automated Guided Vehicles via a Multiview Modeling-Based Hybrid Algorithm." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 21, no. 3 (July 2024): 4753–4767.
- [17] P.Z.H. Sun et al. "AGV-Based Vehicle Transportation in Automated Container Terminals: A Survey." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 24, no. 1 (Jan. 2023): 341–356.
- [18] F.A. Silva et al. "Efficient Strategies for Unmanned Aerial Vehicle Flights: Analyzing Battery Life and Operational Performance in Delivery Services Using Stochastic Models." *IEEE Access* 12 (2024): 144544–144564.
- [19] R. David, and H. Alla. *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [20] A. Giua and M. Silva. "Petri Nets and Automatic Control: A Historical Perspective." *Annual Reviews in Control* 45 (2018): 223–239.
- [21] Y.S. Huang, Y.S. Weng, M. Jeng, and B.Y. Chen. "Based on Synchronized Timed Petri Nets for Urban Traffic Control Systems." In 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Manchester, UK, 384–390.
- [22] Y.S. Huang, Y.S. Weng, and M. Zhou. "Design of Regulatory Traffic Light Control Systems with Synchronized Timed Petri Nets." *Asian Journal of Control* 20 (2018): 174–185.
- [23] H.S. Qi, Y. Yu, Q. Tang, and X.B. Hu. "Intersection Traffic Deadlock Formation and Its Probability: A Petri Net Based Modeling Approach." *IET Intelligent Transport Systems* 16 (2022): 1342–1363.
- [24] L. Zhao et al. "Emergency Vehicle Preemption Control of T-Shaped Intersection with Time Petri Nets." In 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2503–2508.
- [25] Y. Huang, Y. Weng, and M. Zhou. "Design of Traffic Safety Control Systems for Emergency Vehicle Preemption Using Timed Petri Nets." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16, no. 4 (Aug. 2015): 2113–2120.
- [26] L. Qi, M. Zhou, and W. Luan. "A Two-Level Traffic Light Control Strategy for Preventing Incident Based Urban Traffic Congestion." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 99 (Dec. 2016): 1–12.
- [27] Y. Huang, and T. Chung. "Modeling and Analysis of Urban Traffic Light Control Systems." *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 32, no. 1 (2009): 85–95.
- [28] Y.S. Huang, and P.J. Su. "Modeling and Analysis of Traffic Light Control Systems." *IET Control Theory & Applications* 3, no. 3 (2009): 340–350.
- [29] J. Luo, Y. Huang, and Y. Weng. "Design of Variable Traffic Light Control Systems for Preventing Two-Way Grid Network Traffic Jams Using Timed Petri Nets." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 21, no. 7 (July 2020): 3117–3127.
- [30] Y.S. Weng, Y.S. Huang, and C.C. Ho. "Modeling of Traffic Safety Control Systems Using Timed Petri Nets." In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Miami, FL, USA, 138–143, 2014.
- [31] Y.S. Huang, Y.S. Weng, and M. Zhou. "Critical Scenarios and Their Identification in Parallel Railroad Level Crossing Traffic Control Systems." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11, no. 4 (Dec. 2010): 968–977.
- [32] M. Yadollahzadeh Tabari, and A.A. Pouyan. "Misbehavior Analysis of IEEE 802.11 MAC Layer in Mobile Ad Hoc Network Using Stochastic Reward Nets." *International Journal of Communication Systems* (2017).

- [33] M. Yadollahzadeh-Tabari. "A Stochastic Reward Net Model for Performance Analysis of Network Layer in Mobile Ad Hoc Network Under the Workload of Misbehavior Nodes." *Wireless Personal Communications* 118 (2021): 1087–1109.
- [34] G. Ciardo, J. Muppala, and K. Trivedi. "SPNP: Stochastic Petri Net Package." In Proceedings of the Third International Workshop on Petri Nets and Performance Models, 142–151, 1989.
- [35] M. Yadollahzadeh Tabari, and P. Mohammadizad. "Modeling and Performance Evaluation of Energy Consumption in S-MAC Protocol Using Generalized Stochastic Petri Nets." *International Journal of Engineering TRANSACTIONS C: Aspects* 33, no. 6 (June 2020): 1114–1121.
- [36] "Petri Net Simulator." Accessed April 29, 2025. <https://petri-net-simulator.software.informer.com/2.0/>