



Semnan University

## Journal of Modeling in Engineering

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



Research Article

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

Sobhi Baniardalani<sup>1,\*</sup> Saaid Soleimaini<sup>2</sup>

1. Assistant Professor of Department of Power and Control Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

2. Master graduated of Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

\*Corresponding Author: S.baniardalani@kut.ac.ir

---

### PAPER INFO

#### **Paper history:**

Received:

Revised:

Accepted:

#### **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/>

---

## مدل‌سازی و تحلیل سامانه حق تقدم خودروهای اضطراری به کمک شبکه پتری زمانی

صبحی بنی اردلانی<sup>1\*</sup>، سعید سلیمانی<sup>2</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	این مقاله به مدل‌سازی و تحلیل یک سامانه ایجاد حق تقدم امن و سریع برای عبور خودروهای اضطراری مانند آمبولانسها و خودروهای آتش نشانی می‌پردازد. این موضوع در طی سالهای اخیر و با گسترش سامانه‌های هوشمند ترافیک، اهمیت فراوانی یافته است. در این مقاله، روشی برای مدیریت ترافیک و کنترل چراغ‌های راهنمایی شهری پیشنهاد می‌شود که ضمن کاهش زمان توقف خودروهای اضطراری، امنیت تردد و کاهش ازدحام را نیز تضمین می‌کند. 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 پیشامد توصیف می‌شود و از شبکه‌های پتری زمانی، برای مدل‌سازی سیستم و شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی، استفاده می‌شود. شبکه‌های پتری ابزار قدرتمند و شهودی برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های گسسته پیشامد هستند که در این مقاله به کمک آنها، قابلیت‌های الگوریتم ارائه شده از قبیل بررسی وجود قفل شدن ترافیک یا امکان بروز تصادف بررسی می‌شود.
دریافت مقاله:	
بازنگری مقاله:	
پذیرش مقاله:	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
خودرو اضطراری، سامانه حق تقدم، شبکه پتری زمانی، سامانه هوشمند ترافیک، سیستم گسسته پیشامد.	

### ۱-مقدمه

خودروهای اضطراری<sup>۳</sup> (EVs) از جمله آمبولانس‌ها، کامیون‌های آتش‌نشانی 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 می‌دهد که اگر در ۳۰ دقیقه اول تصادف، افرادی که آسیب جدی دیده اند، نجات پیدا نکنند، شانس زنده ماندن آنها ۸۰ درصد کاهش می‌یابد [۱]. اگرچه بر طبق قوانین موجود همه وسایل نقلیه اضطراری مجاز به نقض قوانین متعارف مانند توقف در پشت چراغ‌های قرمز هستند [۲]، اما بهبود ایمنی و کارایی حمل و نقل آنها

مستلزم استفاده از سامانه‌های حق تقدم خودرو اضطراری<sup>۴</sup> (EVP) به ویژه در سامانه‌های ترافیک هوشمند<sup>۵</sup> (ITS) است [۳و۴]. در این سامانه‌ها از یک سو باید موقعیت و جهت و سرعت و مبدا و مقصد این خودروها به کمک حسگرها یا سامانه‌های اطلاعاتی، به درستی و به موقع تشخیص داده شوند و از سوی دیگر باید برنامه زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی را به صورت اضطراری تغییر داد تا مسیر برای عبور خودرو باز شده و پس از عبور خودرو، دوباره زمان‌بندی 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].

<sup>1</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [s.baniardalani@kut.ac.ir](mailto:s.baniardalani@kut.ac.ir)

<sup>2</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

<sup>3</sup> Emergency Vichel

<sup>4</sup> Emergency Vichel Preemption

<sup>5</sup> Intelligent Traffic System

شبکه‌های پتری<sup>۸</sup> (PN) استفاده شده است. در [۱۲] نمودارهای حالت برای مدل‌سازی یک سامانه کنترل چراغ 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 [۱۸-۱۵]. 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<sup>۹</sup> (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<sup>۱۰</sup> (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

در سال‌های اخیر، در کنار گسترش تحقیقات در زمینه ITS، موضوع حق تقدم وسایل نقلیه اضطراری نیز مورد 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<sup>۶</sup>، 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<sup>۷</sup> (FSM) و

<sup>8</sup> Petri Nets

<sup>9</sup> Discrete Event Systems

<sup>10</sup> Stochastic Timed Petri Net

<sup>6</sup> National Transportation Communications for Intelligent Transportation System Protocol

<sup>7</sup> Finite State Machine

چراغ راهنمایی در لحظه ورود EV، زمان‌بندی چراغ به نحوی تغییر می‌کند که چراغ مسیر EV در کوتاه‌ترین زمان سبز شده یا سبز بماند. پس از این که حسگر خروج خودرو، سیگنال عبور خودرو از چهارراه را ارسال کرد، برنامه زمان‌بندی چراغها به حالت معمولی باز می‌گردد. این الگوریتم با استفاده از TPN مدل‌سازی شده است و عملکرد آن برای اطمینان از برگشت‌پذیری و جلوگیری از بن‌بست با استفاده از نمودارهای دسترس‌پذیری ارزیابی می‌شود. ضمناً برای اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی مدل‌ها توسط نرم‌افزار Petri.NET Simulator 2.0 انجام شده و دیاگرام زمانی تغییرات چراغ‌ها ترسیم می‌شود. دلیل اصلی به کارگیری TPN برای مدل‌سازی سیستم، قابلیت مناسب این شبکه در ترجمه به کدهای برنامه‌نویسی کنترل‌کننده‌های برنامه‌پذیر PLC<sup>13</sup> است. در بخش ارزیابی مدل، نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم بر روی PLC‌های زیمنس نیز ارائه شده است که تطابق کامل با نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

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

## ۲- مروری بر شبکه‌های پتری

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

سامانه EVP، شبکه پتری زمانی<sup>۱۱</sup> (TPN) نیز به کار گرفته شده است. نمونه‌هایی از کارهای برجسته در این زمینه 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 شبکه‌های شهری در هنگام تصادفات ارائه می‌کند که می‌تواند به کاهش تراکم ترافیک در مسیرهای منتهی به محل حادثه کمک کند. مراجع [۲۷ و ۲۸] نیز بر اساس شبکه‌های پتری رنگی زمانی، مدلی را برای کنترل ترافیک در تقاطع‌های پیچیده ارائه می‌دهند. در [۲۹]، یک مدل میکروسکوپی و سلولی برای تحلیل شبکه ترافیک، دینامیک خودروها و حرکت عابران پیاده به همراه کنترل‌کننده‌های چراغ‌های راهنمایی استفاده شده است. علاوه بر این، از شبکه‌های پتری نیز برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم استفاده شده است. همچنین، TPN در مدل‌سازی تقاطع‌های موازی سطح راه آهن نیز کاربرد پیدا کرده است [۳۰ و ۳۱].

این مقاله به مدل‌سازی و تحلیل یک سامانه EVP با کمک شبکه پتری زمانی می‌پردازد. برای این کار، مشابه [۲۵]، TPN‌ها برای مدل‌سازی حالت‌های مختلف چراغ راهنمایی در حضور EV‌ها استفاده می‌شوند و نمودارهای دسترسی<sup>۱۲</sup> (RG) برای ارزیابی عملکرد سیستم به کار گرفته می‌شوند. در [۲۵]، علاوه بر اشتباهات متعدد در مدل و گراف‌های 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 گراف‌های دسترسی سیستم شده است. با توجه به این که در مقاله حاضر، تمامی حالات ممکن برای ورود خودرو در نظر گرفته می‌شوند، نیازی به این تاخیر تصادفی در مدل‌سازی وجود ندارد و لذا با حذف این تاخیر، مدل TPN سیستم ساده‌تر شده و در نتیجه پیچیدگی نمودارهای دسترسی حاصله بسیار کمتر می‌شود. این موضوع به تحلیل دقیق‌تر رفتار سیستم کمک زیادی می‌کند.

در این مقاله، فرض می‌شود که یک حسگر، ورود EV را به تقاطع چهار طرفه با چراغ‌های راهنمایی دو فاز تشخیص می‌دهد. طبق الگوریتم پیشنهادی، با در نظر گرفتن وضعیت

<sup>13</sup> Programmable Logic Controller

<sup>11</sup> Timed Petri Net

<sup>12</sup> Reachability Graph

-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؟

-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 چهار راه 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 چهار راه، عبور خودرو اضطراری از چهار راه 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.

مکان‌ها را مشخص می‌کند و با یک ماتریس  $m \times n$  نشان داده می‌شود؛

$M_0$  نشانه‌گذاری اولیه است.

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

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

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

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

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

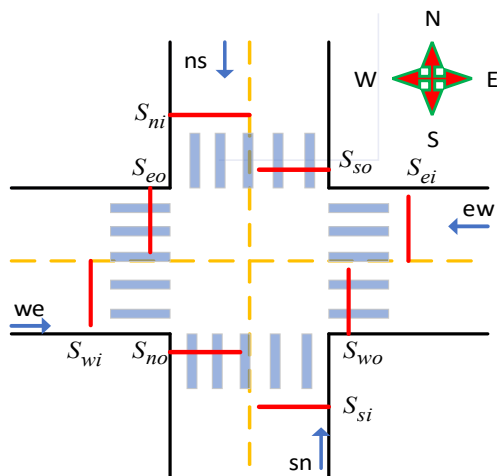
$$p^* = \{t \in T \mid Pre(p, t) > 0\}.$$

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 دسته‌ای از TPNها اطلاعات زمانی به هر یک از مکان‌ها تخصیص داده می‌شود که به آنها  $PTPN$ <sup>۱۴</sup> گفته می‌شود، در حالیکه در گروه دیگری از TPNها اطلاعات زمانی رویدادها به گذرها منتسب می‌شود که آنها را  $TTPN$ <sup>۱۵</sup> 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.

<sup>15</sup> Transition TPN

<sup>14</sup> Placed TPN



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

### 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.

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  $R_{sn}$  و  $R_{ns}$  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 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 اولیه‌ی 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.

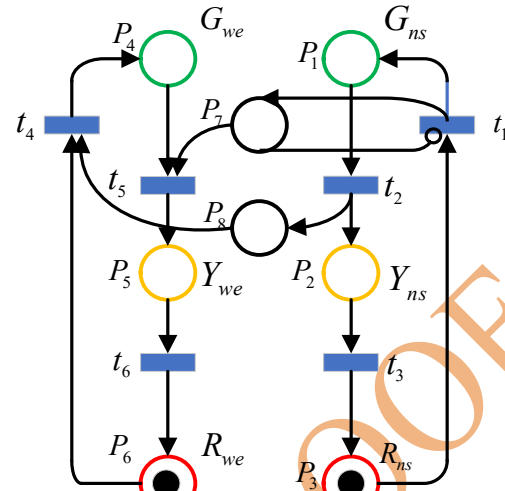
دارد که در واقع همان حالت  $M_0$  است که چون در اولین سیکل کاری مدت تاخیر آن ۵ ثانیه و در سیکلهای بعدی ۲ ثانیه است، برای مشخص شدن بهتر حلقه تکرار، این حالت به دو بازه زمانی ۳ ثانیه ( $M_{00}$ ) و ۲ ثانیه ( $M_0$ ) تفکیک شده است.

#### ۴- سناریوهای ایجاد حق تقدم برای EV

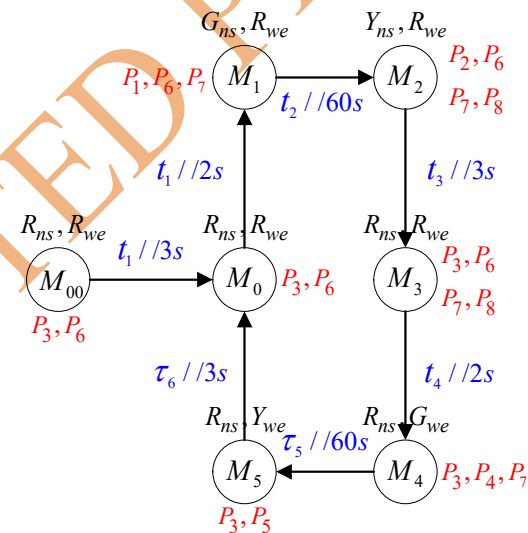
با توجه به گراف شکل ۳ ممکن است که زمان ورود خودرو اضطراری در هریک از حالت‌های  $M_0$  تا  $M_5$  باشد و چون هدف اصلی این است که در هر حالت، کمترین زمان تاخیر در مسیر این خودرو ایجاد شود، لذا در هر حالت، سامانه کنترل باید بر اساس یک سناریو مشخص و احتمالاً متفاوت با سناریوهای حالات دیگر، فرمانهای لازم 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 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 نشان‌دهنده 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



شکل ۲- مدل چراغ راهنمایی در حالت عادی

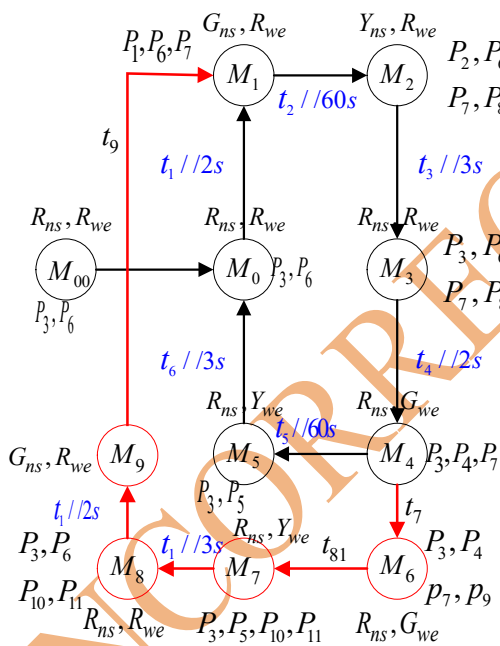


شکل ۳- گراف دسترسی TPN در حالت عملکرد عادی چراغ راهنمایی

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 مسیرها 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

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. 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.

شکل ۵ گراف دسترسی این سناریو را همراه با گراف دسترسی حالت معمولی چراغ راهنمایی نشان می‌دهد. مسیر قرمز رنگ حالت‌های سناریوی خیلی فوری است که نهایتاً به سیکل عادی چراغ راهنمایی برمی‌گردد.

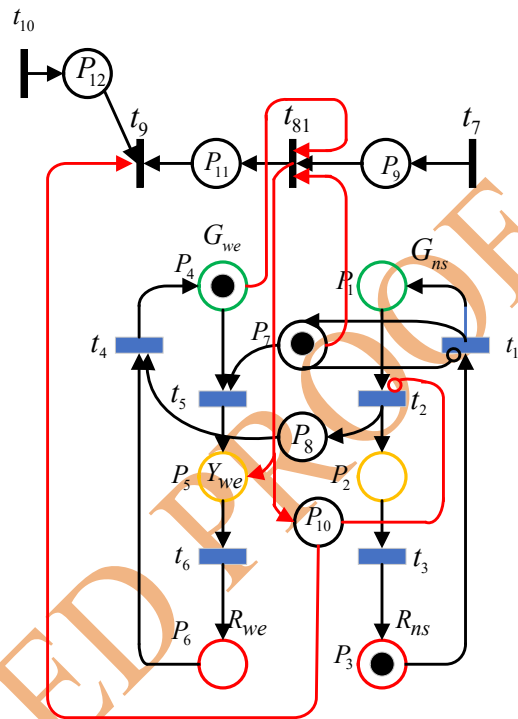


شکل ۵- گراف دسترسی حالت معمولی چراغ راهنمایی

۴-۲- سناریوی فوری

این موقعیت شامل حالت‌هایی 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 نمی‌گیرد. طبیعتاً تغییر زمان بندی چراغ راهنمایی نسبت به حالت خیلی فوری راحتتر است،

مراحل زیر است که در شکل ۴ توسط کمانهای قرمز رنگ نشان داده شده‌اند.



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

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

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

۳- مکان  $P_{10}$  نشانه‌دار می‌شود که در نتیجه از تغییر حالت  $G_{ns}$  (سبز) به زرد تا عبور خودرو EV از چهارراه جلوگیری می‌شود.

۴- مکان  $P_5$  نشانه‌دار می‌شود که در نتیجه چراغ زرد  $Y_{we}$  روشن شده و شرایط برای قرمز شدن  $R_{we}$  فراهم می‌شود. در نتیجه این تغییرات گذرهای  $t_1$  و  $t_6$  فعال خواهند شد. پس از  $t_6$  از ۳ ثانیه شلیک شده و 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.

۵- مکان  $P_{11}$  دارای نشانه می‌شود که نشان‌دهنده فعال بودن سامانه حق تقدم EV است.



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 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

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 می‌شود که برای هر دو یک سناریو مطابق شکل ۶ طراحی شده 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.

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 می‌شود. با این کار شرایط برای روشن شدن  $G_{ns}$  فراهم می‌شود تا مسیر حرکت EV باز 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

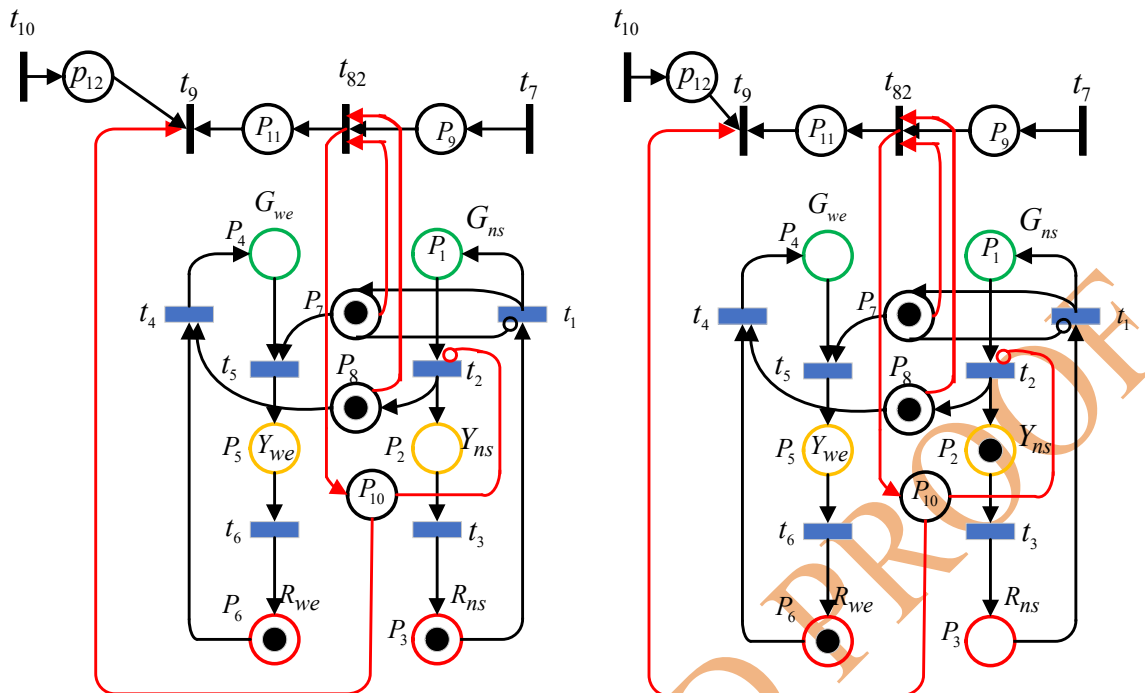
این تغییرات تنها گذر فعال  $t_3$  خواهد بود که با تاخیر  $\tau$  بعد از شلیک  $t_{82}$ ، شلیک می‌شود. از آنجا که مدت زمان تاخیر  $t_3$  حداکثر ۳ ثانیه است، بنابراین  $0 \leq \tau \leq 3$ .

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

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.

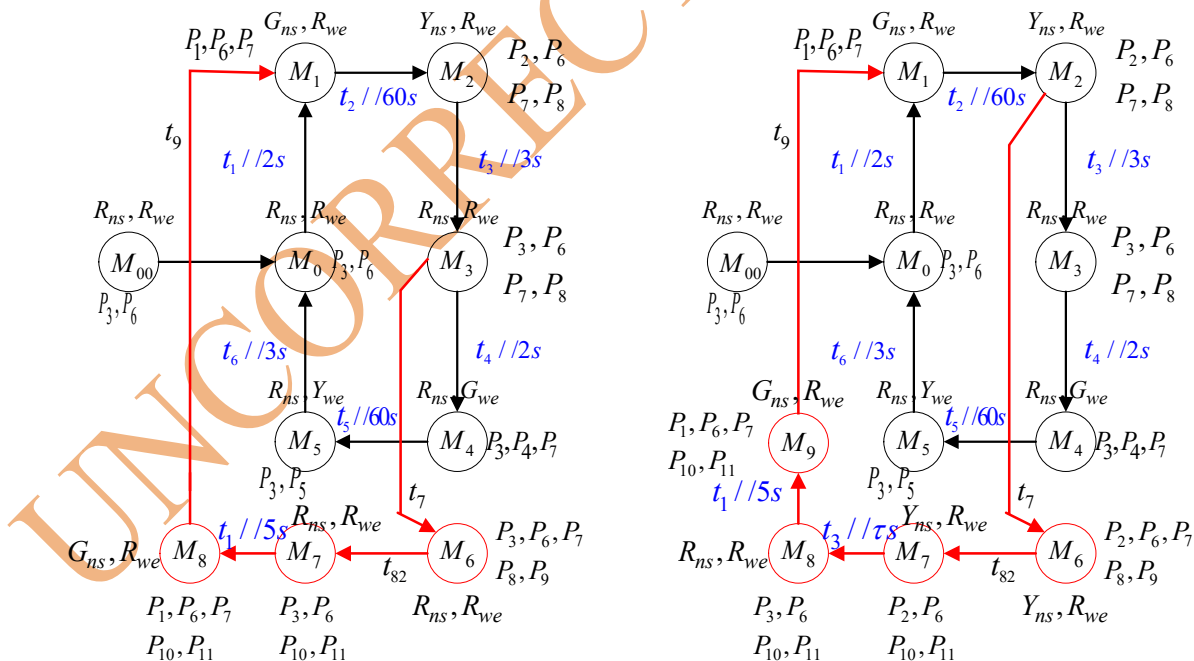
پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر  $S_{no}$  گذر  $t_{10}$  فعال شده و مکان  $P_{12}$  نشانه‌دار می‌شود. با توجه به نشانه‌دار بودن  $P_{11}$  شرایط برای شلیک  $t_9$  فراهم می‌گردد. در نتیجه مکان  $P_{10}$  بدون نشانه می‌شود که با توجه به نوع کمان آن که سرکوبگر است، شرایط برای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



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

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

شکل ۶- TPN نشان دهنده سناریوی فوری



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

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

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  $\tau$  بعد از شلیک  $t_{82}$ ، شلیک می‌شود. از آنجا که مدت زمان حالت  $M_0(R_{ns}, R_{we})$   $t_1$  ۲ 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. گراف دسترسی این TPN در شکل ۹-الف ترسیم شده است.

- سناریو نیمه فوری برای حالت  $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ 

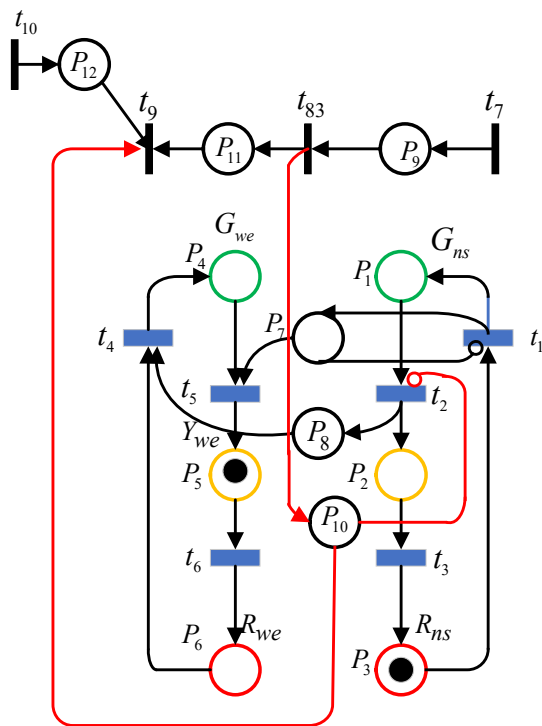
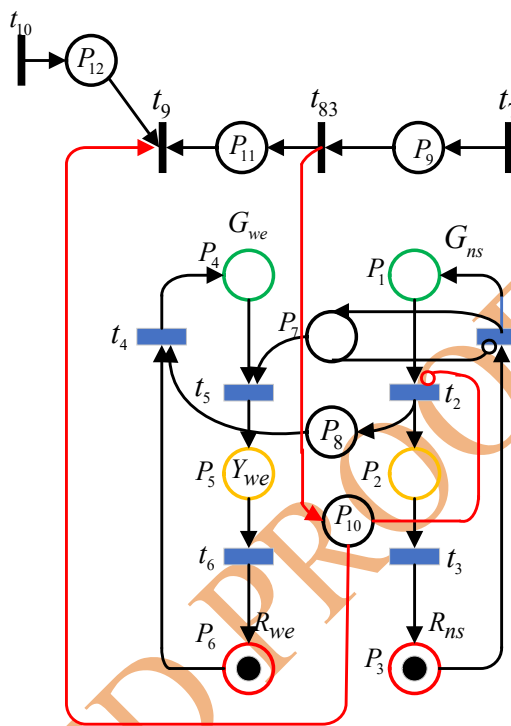
در این حالت نیز، با فعال شدن گذر  $t_7$  که نشان‌دهنده‌ی ورود EV است، مکان  $P_9$  دارای نشانه می‌شود و سپس با فعال شدن گذر  $t_{83}$  سامانه کنترل حق تقدم EV فعال می‌شود. این عملیات برای شکل ۸-ب شامل مراحل زیر است. (در این موقعیت، حالت اولیه چراغ راهنمایی در لحظه ورود خودرو حالت  $M_5(R_{ns}, Y_{we})$  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  $\tau$  بعد از شلیک  $t_{82}$ ، 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  $t_9$  فراهم می‌گردد. پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط حسگر  $S_{no}$  گذر  $t_9$  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.

ب- ورود خودرو اضطراری در حالت  $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ الف- ورود خودرو اضطراری در حالت  $M_0(R_{ns}, R_{we})$ - سناریو نیمه فوری برای حالت  $M_1(G_{ns}, R_{we})$ 

در این حالت نیز 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  $t_{83}$  سامانه کنترل حق تقدم EV فعال می شود. 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 می شود.

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

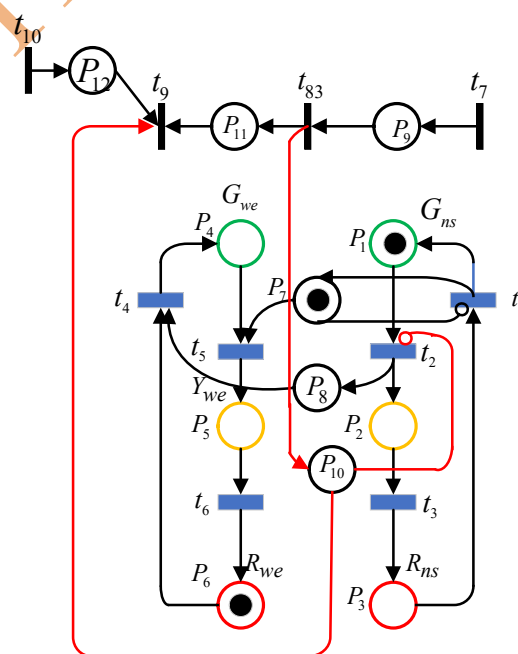
۳- در نتیجه این تغییرات هیچ گذری فعال نیست. تنها

گذری که می تواند فعال شود، گذر  $t_9$  خواهد بود که پس از عبور خودرو اضطراری از تقاطع و ارسال سیگنال توسط

حسگر  $S_{no}$  گذر  $t_{10}$  فعال شده و مکان  $P_{12}$  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. ضمناً مکان  $P_{11}$  نیز بدون نشانه می شود که به معنی غیر فعال شدن سامانه حق تقدم

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

شکل ۸- TPN نشان دهنده سناریوی نیمه فوری

مراجع [32-33] بررسی کارایی شبکه‌های تلفن همراه در حالت وجود حملات سایبری از طریق مدل‌سازی آنها توسط شبکه پتری تصادفی انجام شده است [34]. همچنین در [35] یک مدل تحلیلی بر اساس شبکه پتری تصادفی تعمیم یافته<sup>۱۶</sup> (GSPN) برای ارزیابی مصرف انرژی گر‌ها در یک شبکه حسگر بی سیم مبتنی بر پروتوکل MAC-S<sup>۱۷</sup> 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.

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 شده است. 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 هر دو چراغ قرمز روشن هستند که کاملاً تردد خودروهای مسیر غرب به شرق متوقف شود و سپس چراغ  $G_{NS}$  روشن می‌شود.

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 هر یک 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.

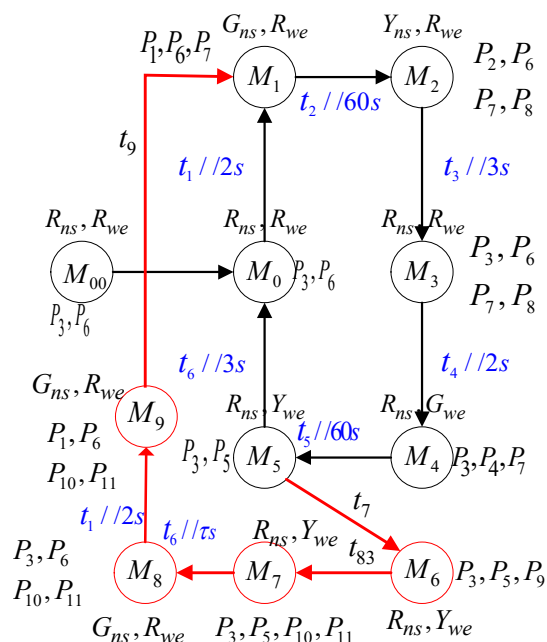
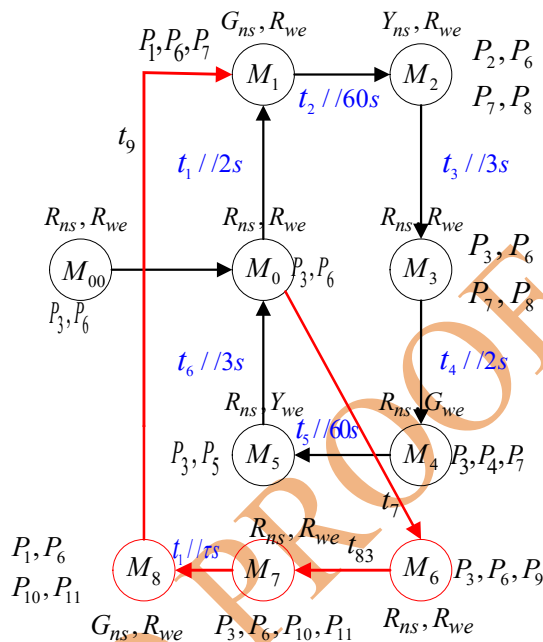
۳- در تمامی سناریوها ضمن تضمین عبور EV در کوتاهترین زمان ممکن، هیچگونه برخورد و تصادفی پیش نمی‌آید و از اینرو سامانه EVP پیشنهادی، کاملاً امن است.

#### 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

<sup>17</sup> Sensor-Media Access Control

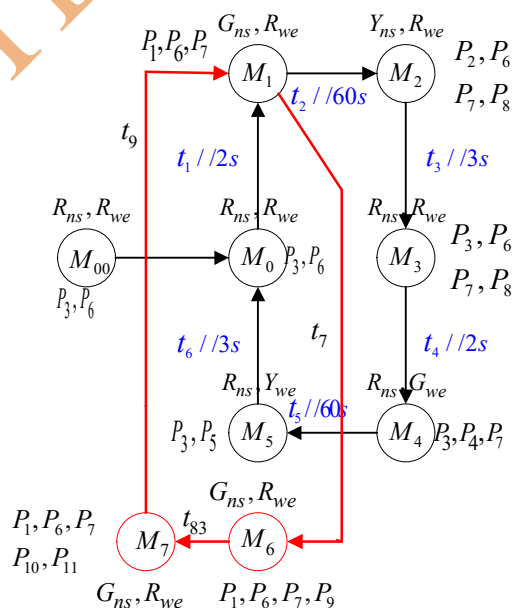
<sup>16</sup> Generalized Stochastic Petri Net (GSPN)

ب- ورود خودرو اضطراری در حالت  $M_5(R_{ns}, Y_{we})$ الف- ورود خودرو اضطراری در حالت  $M_0(R_{ns}, R_{we})$ 

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 زمان‌بندی حاصل از شبیه‌سازی مدل‌ها دقیقاً متناظر با زمان‌بندی 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 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  $STL^{18}$  که از معروف‌ترین زبان‌های برنامه‌نویسی برای کنترل‌کننده‌های قابل برنامه‌ریزی<sup>۱۹</sup> (PLC) است ترجمه شده و سپس بر روی PLC مدل S7-300 زیمنس اجرا گردید. برای مانیتورینگ سیستم و ترسیم دیاگرام‌های زمانی وضعیت چراغ‌ها نیز از نرم‌افزار

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

شکل ۹- گراف‌های دسترسی برای سناریوی نیمه فوری 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

<sup>19</sup> Programmable Logic Controller<sup>18</sup> Statement List

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.

جهت ادامه و توسعه تحقیق در این زمینه می‌توان موضوع پیاده‌سازی 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.

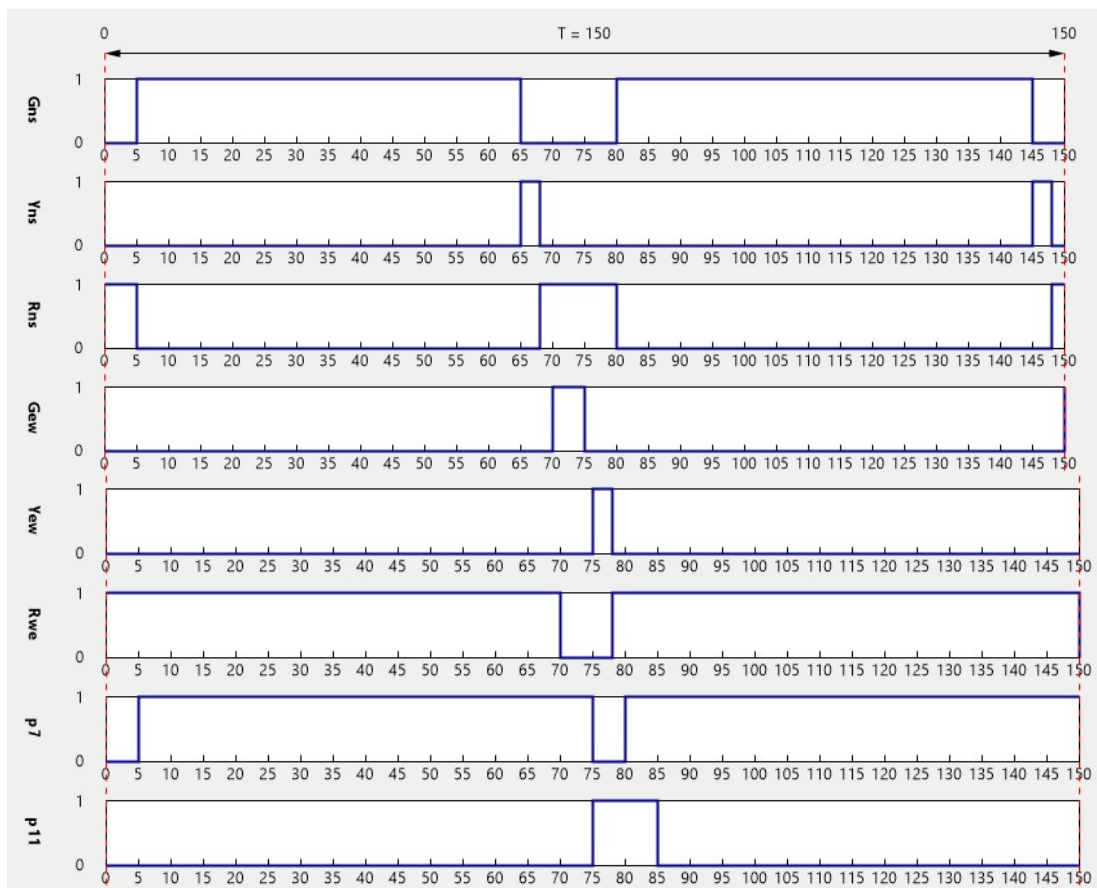
#### تقدیر و تشکر

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

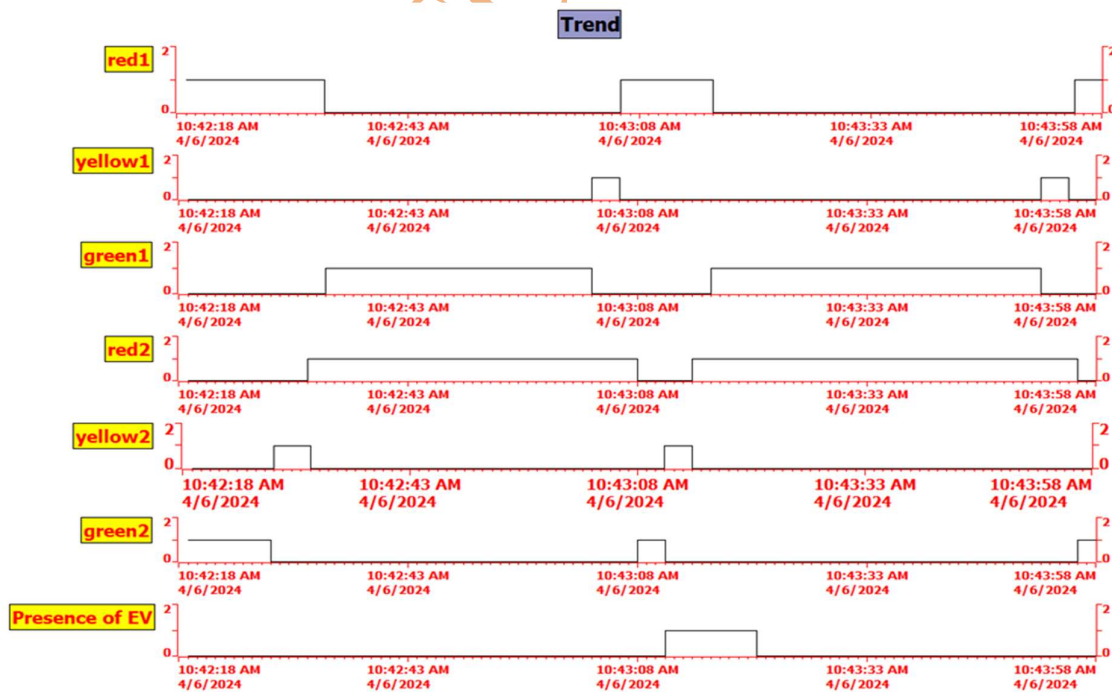
Siemens WinCC flexible 2008 sp5 استفاده شده است. شکل ۱۱ نشان‌دهنده دیاگرام زمانی تغییرات چراغ‌های راهنمایی در حالت سناریوی خیلی فوری است. در این شکل چراغ‌هایی که با شماره ۱ مشخص شده‌اند همان چراغ‌های مسیر شمال-جنوب و چراغ‌های شماره ۲، چراغ‌های شرق به غرب هستند. ضمناً برای ترسیم بهتر دیاگرام زمانی، زمان چراغ سبز از ۶۰ ثانیه در شبیه‌سازی TPN به ۳۰ ثانیه کاهش یافته است. 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، زمان‌بندی 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



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



## مراجع

- [1] L. Lu and S. Wang, "Literature review of analytical models on emergency vehicle service: location, dispatching, routing and preemption Control," 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Auckland, New Zealand, pp. 3031-3036, 2019.
- [2] P. Koonce et al., Signal timing manual. Washington, DC, USA: 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," in IEEE Access, Vol. 10, pp. 109729-109742, 2022.
- [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, Vol. 9.1, pp. 60-71, 2022.
- [5] N. Zhang, F.Y. Wang, F. Zhu, and D. Zhao, "DynaCAS: Computational experiments and decision support for ITS," IEEE Intell. Syst., Vol. 23, No. 6, pp. 19–23, Nov./Dec. 2008.
- [6] F. Y. Wang, "Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems," IEEE Intell. Syst., Vol. 23, No. 6, pp. 8–13, Nov./Dec. 2008.
- [7] Kamalanathsharma, R. Kishore and H. Kathleen, "Traffic signal preemption for emergency vehicle," U.S. Dept. Transp., Washington, DC, USA, 2006.
- [8] O. Karpis, "System for vehicle classification and emergency vehicle Detection," IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 7, 2012, pp. 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," J. Inf. Sci. Eng., Vol. 26, pp. 801–815, 2010.
- [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, pp. 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. Int. IEEE Annu. Conf. Intell. Trans. Syst., Funchal, Portugal, pp. 74–79, Sep. 2010.
- [12] Y. Huang, "Design of traffic light control systems using statecharts," in The Computer Journal, Vol. 49, No. 6, pp. 634-649, Nov. 2006.
- [13] Y. S. Weng, Y. S. Huang, S. F. Su and C. S. Yu, "Modeling of emergency vehicle preemption systems using statecharts," 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Anchorage, AK, USA, 2011, pp. 556-561.
- [14] M. Sakthimohan., G. Elizabeth Rani., T. Radhika, P. Sneha, M. Gowthaman and S. Melvin, "FSM based coordinated four-way intersection specific automated traffic light controller," 2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, pp. 1726-1731, 2023.
- [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," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 24, No. 12, pp. 14453-14466, Dec. 2023.
- [16] B. Xin et al., "Simultaneous scheduling of processing machines and automated guided vehicles via a multi-view modeling-based hybrid algorithm," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 4753-4767, July 2024.
- [17] P. Z. H. Sun et al., "AGV-Based vehicle transportation in automated container terminals: A Survey," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 341-356, Jan. 2023.
- [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," in IEEE Access, Vol. 12, pp. 144544-144564, 2024.
- [19] R. David and H. Alla, Discrete, continuous, and hybrid Petri Nets, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [20] A. Giua, M. Silva, "Petri Nets and automatic control: A historical perspective", Annual Reviews in Control, Vol. 45, pp. 223-239, 2018.

- [21] Y. S. Huang, Y. S. Weng, M. Jeng and B. Y. Chen, "Based on synchronized Timed Petri Nets for urban traffic control systems," 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Manchester, UK, pp. 384-390 2013.
- [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, pp. 174-185, 2018.
- [23] H. S. Qi, Y. Yu, Q. Tang, X. B. Hu, "Intersection traffic deadlock formation and its probability: A petri net-based modeling approach". IET Intell. Transp. Syst. 16, 1342-1363, 2022.
- [24] L. Zhao, L. Pu, Z. Zhao, B. Huang, J. Hao and Y. Huang, "Emergency vehicle preemption control of T-shaped intersection with Time Petri Nets," 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, pp. 2503-2508, 2018.
- [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., Vol. 16, No. 4, pp. 2113-2120, Aug. 2015.
- [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., Vol. 99, pp. 1-12, Dec. 2016.
- [27] Y. Huang and T. Chung, "Modeling and analysis of urban traffic light control systems," Journal of the Chinese Institute of Engineers, 32:1, 85-95, 2009.
- [28] Y. S. Huang and P. J. Su, "Modeling and analysis of traffic light control systems," IET Control Theory & Applications, Volume 3, Issue 3, pp. 340-350, 2009.
- [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, Vol: 21, Issue: 7, pp. 3117-3127, July 2020.
- [30] Y. S. Weng, Y. S. Huang and C. C. Ho, "Modeling of traffic safety control systems using timed Petri nets," Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Miami, FL, USA, pp. 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," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 968-977, Dec. 2010.
- [32] M. Yadollahzadeh Tabari, AA. Pouyan, "Misbehavior analysis of IEEE 802.11 MAC layer in mobile ad hoc network using stochastic reward nets," Int J Commun Syst. 2017.
- [33] M. Yadollahzadeh-Tabari, "An stochastic reward net model for performance analysis of network layer in mobile Ad Hoc network under the workload of misbehavior nodes," *Wireless Pers Commun* 118, pp. 1087-1109, 2021.
- [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, pp. 142-151, 1989.
- [35] M. Yadollahzadeh Tabari, P. Mohammadzad, "Modeling and performance evaluation of energy consumption in S-MAC protocol using generalized stochastic Petri Nets," International Journal of Engineering TRANSACTIONS C: Aspects Vol. 33, No. 6, pp. 1114-1121, June 2020.
- [36] <https://petri-net-simulator.software.informer.com/2.0/>