Archive of SID

فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال هفتم / شماره ۲۰ / تابستان ۱۳۹۱

مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک شهری با شبکه‌های پتری رنگین

خداکرم سلیمی فرد (نویسنده مسؤول)
استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
Email: salimifard@pgu.ac.ir
مهدی انصاری
کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱ * تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۲۲

چکیده

یک شبکه آمد و شد خودروهای شهری در واقع یک سیستم گسسته پیشامد است که در آن چراغ‌های راهنمایی یک ابزار کارآمد برای کنترل جریان آمد و شد خودروها می‌باشد. زمان‌بندی درست چراغ‌های راهنمایی می‌تواند تأثیری شگرف بر روانی آمد و شد خودروها، شمار خودروهای منتظر پشت چراغ راهنمایی، و مدت زمان سفرهای شهری داشته باشد. در این مقاله، برای دستیابی به زمانبندی چراغ‌های راهنمایی، با بهره‌گیری از شبکه‌های پتری رنگین، یک مدل ترافیکی ساخته شده است. منطق کنترل زمانی چراغ‌ها، و جریان آمد و شد خودروها در مدل لحاظ شده است. با به کارگیری شبیه‌سازی رایانه‌ای، سناریوهای مختلف زمان‌بندی مدل‌سازی و ارزیابی گردید. افزون بر این، برای نشان دادن کاربردی بودن مدل پیشنهادی، یکی از چهارراه‌های شهر بوشهر با این روش، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. بر اساس برون داده های شبیه‌سازی، یک زمانبندی مناسب برای چراغ‌های راهنمایی تعیین شد. سناریو زمانبندی پیشنهادی توانست به بهبودی شگرف در عملکرد چهار راه دست یابد.

واژه‌های کلیدی: ترافیک شهری، چراغ راهنمایی، شبکه‌های پتری رنگین، شبیه‌سازی.

www.SID.ir

Archive of SID

۱-مقدمه

بررسی علمی سیستم‌ها برای طراحی، شناخت و بهبود عملکرد آن‌ها امری لازم در روند سریع پیشرفت‌های اقتصادی، صنعتی و اجتماعی کشور است. سیستم حمل و نقل درون شهری یکی از زیرساخت‌های بنیادین و مهم هر کشور است. از این رو، بررسی علمی و دستیابی به راهکارهای بهبود، می‌تواند در برنامه‌ریزی کارآمد و بهره‌گیری بهتر و نیز افزایش کارایی آن اثر گذار باشد (Smit & Ntziachristos, 2010). تجزیه و تحلیل جریان ترافیک از دو دیدگاه خرد و کلان امکان پذیر است. در دیدگاه خرد، به چگونگی حرکت هر خودرو توجه می‌شود. در دیدگاه کلان، متغیرهای کلان ترافیک مانند چگالی، حجم و میانگین سرعت خودروها تجزیه و تحلیل می‌گردد. سیستم‌های مدیریت ترافیک در پی کاهش راه بندان، دیرکردها، مصرف سوخت و نیز آلودگی می‌باشند.

یک شبکه حمل و نقل از یگان‌هایی مانند خیابان‌ها، تقاطع‌ها، بزرگراه‌ها و پارکینگ‌ها ساخته شده است. در این میان، تقاطع‌ها که محل برخورد جریان‌های ترافیکی هستند از اهمیت به سزایی برخوردارند. شمار زیادی از تصادفات وسایل نقلیه، دیرکردها و مشکلات به دلیل برخورد جریان‌های ترافیکی در این گونه چندراهه‌ها رخ می‌دهد (De Oliveira & Camponogara, 2010). از اینرو، به ابزارهایی کارآمد برای مدیریت جریان ترافیک در تقاطع نیاز است. رایج‌ترین ابزار برای تنظیم و مدیریت ترافیک شهری و شبکه‌های خیابانی، چراغ راهنمایی می‌باشد (Shabani, 2008).

پدیده‌ی راه‌بندان و کندی آمد و شد خودروها یکی از مسأله‌های مهم در شبکه‌های حمل و نقل شهری است. امروزه، رشد شهرنشینی و افزایش شمار خودروها باعث افزایش روزافزون تقاضای سفر گردیده است. این واقعیت، منجر به تحمیل بار اضافی بر شبکه خیابانی شهرها می‌گردد. پیامد این موضوع، بروز مشکلاتی مانند تراکم، شلوغی، آلودگی و تصادف است که سبب هرزرفت شگرف منابع انسانی و اقتصادی در شهرها و نیز تحمیل هزینه‌های کلان می‌شود. در واقع، می‌توان کندی آمد و شد خودروها را بهایی دانست که جامعه در ازای سودمندی به دست آمده از به کارگیری وسایل نقلیه می‌پردازد. امروزه هزینه این راه‌بندان‌ها بسیار زیاد شده است. هنگامی‌که در جایی از شبکه ارتباطی شهری ازدحام پدید می‌آید، رفت و آمد کند می‌شود، خودروها از حرکت باز می‌مانند و پدیده راه‌بندان رخ می‌دهد. در این شرایط زمان به هدر می‌رود، امکان استفاده از فرصت‌ها از بین می‌رود، انرژی بیهوده مصرف می‌شود، آلودگی به بار می‌آید و مردم خسته و فرسوده می‌شوند. همه این‌ها هزینه‌های گزافی است که ازدحام آمد و شد خودروها بر جامعه تحمیل می‌نماید. بر این اساس، امروزه ترافیک و برنامه‌ریزی حمل و نقل از مهمترین موضوع های مدیریت شهری می‌باشد (Ansari, 2011).

یک شبکه ارتباطی شهری، ترکیبی از خیابان‌ها و رابطها است که به شکل مجموعه‌ای همبند کار می‌کنند و یک سیستم را می‌سازند. کارآیی این سیستم به شمار و نوع استفاده کنندگان از تسهیلات موجود در آن بستگی دارد. این موضوع، به ویژه در جایگاه برخورد اجزای این سیستم، که تقاطع نامیده می‌شود، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. یک تقاطع، محل برخورد دو یا چند راه آمد و شد است که در آن تسهیلات مورد نیاز برای حرکت‌های مختلف ترافیکی همراه با ایمنی و کارایی فراهم می‌شود (Shabani, 2008). هرگاه حجم ترافیک افزایش می‌یابد، معمولاً، تقاطع نخستین جایی است که عدم توانایی خود را نشان می‌دهد. این موضوع به روشنی با افزایش تراکم و دیرکردها در تقاطع و کاهش ایمنی و افزایش تصادفات در آن به چشم می‌خورد (Hounsell & Shrestha, 2009). بنابراین، مدیریت آمد و شد خودروها در تقاطع از اهمیت ویژه‌ای در یک شبکه حمل و نقل شهری برخوردار است.

پیشینه‌ی کنترل آمد و شد به پیشینه خودرو یعنی به دهه ۱۸۶۰ در لندن باز می‌گردد، زمانی که یک چراغ راهنمایی برای ایمنی اعضای پارلمان در یک تقاطع نزدیک پارلمان نصب شد. نخستین چراغ راهنمایی امروزین در سال ۱۹۲۰ در دیترویت بکار گرفته شد. از این شروع ساده و ابتدایی، سیستم‌های کنترل تقاطع‌ها، تابلوهای متغیر، سیستم‌های کنترل سرعت و مانند اینها به وجود آمد. کم کم، چراغ‌های کنترل ترافیک از ساختار نخستین با زمان‌بندی ثابت به شیوه امروزین خود یعنی کنترل تقاطع بر اساس شمارش ترافیک موجود بهبود یافت. در سال ۱۹۲۰ در ۵ نقطه آمریکا سیستم‌هایی نصب گردید که با استفاده از رایانه های آن

www.SID.ir

Archive of SID

زمان برنامه‌ریزی شده بود (Rahman & Ratrout, 2009). در یک شبکه حمل و نقل شهری، تقاطع‌ها و چراغ‌های راهنمایی نقش‌های مهمی در مدیریت آمد و شد خودروها بازی می‌کنند.

شبکه ترافیک شهری می‌تواند همچون یک سیستم پویای گسسته دیده شود. پویایی این شبکه‌ها به برهم کنش پیچیده زمان‌بندی رویدادهای گسسته گوناگون مانند تنظیم ورود و خروج وسایل نقلیه از تقاطع‌ها با استفاده از چراغ‌های راهنمایی بستگی دارد. با توجه به توانایی شبکه‌های پتری در مدل نمودن هم‌زمانی و ناهم‌زمانی، این مدل‌ها قادرند برای هر دو سطح خرد و کلان سیستم‌های ترافیک شهری به کار گرفته شوند. در سال ۱۹۸۶، برای نخستین بار مدل‌سازی شبکه‌های پتری رنگین یک چراغ راهنمایی ارائه شد. ایده‌ی کاربرد شبکه‌های پتری در مدل شبکه‌های ترافیکی در سال ۱۹۹۱ نیز دوباره مطرح شد (Huaitien & List, 2009).

اوینری (Avineri, 2005) کاربرد تکنیک‌های نرم در سیستم‌های ترافیک و حمل و نقل را بازخوانی نمود. وی مسأله ترافیک را در قالب تکنیک‌هایی مانند مجموعه‌های فازی، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک دسته‌بندی کرد. استفاده از روش‌های علم فیزیک توسط هلبینگ (Helbing, 2002) نیز در شبیه‌سازی دیدگاه‌های خرد و کلان ترافیک بزرگراه مورد استفاده قرار گرفت. یوچو و چانک (Yu Chou & Chung, 2001) در پژوهشی با عنوان کاربرد شبیه سازی کامپیوتری در طراحی یک زمان گیرنده علائم ترافیکی به استفاده از شبیه‌سازی در به دست آوردن بهترین زمان علائم ترافیکی در چهارراه پرداخته و کاهش ۲۰ درصدی زمان انتظار خودروها در پشت چراغ را نتیجه گرفتند. همچنین، دی‌فبرارو و همکاران (Di Febbraro & Sacco, 2002) فاصله زمانی بهینه برای هماهنگی مدت زمان چراغ‌های راهنمایی را با به کارگیری شبکه‌های پتری تعیین کردند.

تولبا و لفبوره (Tolba & Lefebvre, 2003) در پژوهشی با عنوان ارزیابی عملکرد کنترل ترافیک در یک چهارراه با شبکه‌های پتری به مدل‌سازی و ترکیب دو دیدگاه خرد و کلان پرداخته‌اند. در سال ۲۰۰۳، لین و همکاران (Lin, Tang, Mu, & Shi, 2003) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی سیستم‌های حمل و نقل با سیستم‌های هیبریدی، نقاط قوت و ضعف مدل‌های خرد و کلان را بررسی کردند. لی و همکاران (Li, Lin, & Liu, 2005) نیز با تجزیه و تحلیل سیستم‌های گسسته پیشامد، رویکردی نو برای مدل‌سازی کنترل چراغ‌های راهنمایی پیشنهاد دادند. آنان برای این کار از شبکه‌های پتری استفاده کردند و توانستند سیاست‌های اولویت‌بندی و نیز دیرکرد چراغ‌ها را بررسی نمایند. دوتولی و فانتی (Dotoli & Fanti, 2009) با اعتبارسنجی یک مدل شبکه ترافیک شهری با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین زمانمند، آن را تجزیه و تحلیل نمودند. لیست و مسیت (List & Cetin, 2004) با به کارگیری شبکه‌های پتری، یک مدل ۸ مرحله‌ای برای مدل‌سازی کنترل چراغ راهنمایی ارائه دادند.

تولبا و لفبوره (Tolba & Lefebvre, 2003) در پژوهشی برای مدل‌سازی کلان و خرد جریان ترافیک از شبکه‌های پتری زمانمند پیوسته استفاده کردند. در مدل پیشنهادی، خیابان‌ها با نماد مکان و جریان آمد و شد خودروها با نماد گذار مدل‌سازی شد. هوانگ و چانگ (Huang & Chung, 2006) با ارائه‌ی مدلی برای چهارراه‌های پیچیده و تعیین فازبندی برای هر مرحله اقدام به طراحی و تجزیه و تحلیل چراغ‌های راهنمایی با شبکه‌های پتری رنگین زمانمند کردند. هم‌چنین، آنان (Huang & Chung, 2006) یک کنترل‌کننده برای شبکه‌های ترافیک شهری طراحی کردند که با شبکه‌های پتری رنگین زمانمند به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک شهری می‌پرداخت. هم‌چنین، این دو (Huang & Chung, 2006) یک روش نوین مدل‌سازی برای چراغ‌های راهنمایی بر اساس شبکه‌های پتری رنگین ارائه دادند و به مدل‌سازی و شبیه‌سازی و به دست آوردن گراف‌های پیشامد و رابطه‌ی میان ویژگی زنده بودن شبکه و برگشت‌پذیری پرداختند.

دستیابی به کنترل بهینه چراغ‌های راهنمایی یکی از زمینه‌های پژوهشی در حمل و نقل شهری است. لیست و چتین (List & Cetin, 2004) برای کنترل چراغ‌های راهنمایی از یک مدل شبکه پتری استفاده نمودند. آنان با تغییر در ساختار عملیاتی سیستم، توانستند شیوه‌ای نو برای کنترل چراغ‌های راهنمایی و گذر ایمن خودروها از چهار راه پیشنهاد دهند. دجانگ و دالی (De Jong & Daly, 2007) عدم اطمینان در پیش‌بینی ترافیک در کشور هلند را بررسی نمودند. سوآرس و ورانکن

www.SID.ir

Archive of SID

(Soares & Vrancken, 2007) با مدل‌سازی و استفاده از درخت دسترس‌پذیری برای تجزیه و تحلیل سیستم، به مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل چراغ‌های جاده‌ای با شبکه‌های پتری و منطق خطی اقدام کردند. برخی از پژوهشگران کنش میان خودروها و عابران پیاده را در کانون توجه خود قرار دادند. ژانگ و هولی (Zhang & Houli, 2007) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی جریان ترافیک در پیاده‌روها در یک شبیه‌سازی خردنگر با ماشین‌های خودکار سلولی، با تمرکز بر رفتار عابران و تأثیر آن بر جریان آمد و شد خودروها و عابران، مدت زمان انتظار خودروها را بررسی نمودند.

لی و لی (Li & Li, 2008) با مدل‌سازی و ارائه‌ی مفاهیم و تحلیل‌های ریاضی به مدل‌سازی سیستم ترافیک شهری بر اساس شبکه‌ی پتری تصادفی پویا پرداختند. فرهی و همکاران (Farhi, Goursat, & Quadrat, 2009) در پژوهشی با عنوان مدل‌های ترافیک جاده‌ای با به کارگیری آمیزه شبکه‌های پتری و روش جبری Minplus، توانستند بار ترافیکی خودروها بر روی جاده را مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل نمایند. در پژوهشی با عنوان طراحی علائم ترافیکی پاسخگو، سوآرس و ورانکن (Soares & Vrancken, 2008) با به کارگیری شبکه‌های پتری مدت زمان بهینه برای سبز بودن چراغ‌ها را برآورد نمودند. در پژوهش دیگری با عنوان مدل‌سازی و ارزیابی کنترل چراغ راهنمایی با شبکه‌ی پتری زمانمند، وانگ و جین (Wang, Jin, & Deng, 1999) به بررسی کاربردهای شبکه‌های پتری در کنترل چراغ راهنمایی و تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداختند. رحمان و راتروت (Rahman & Ratrout, 2009) به کارگیری منطق فازی در کنترل علائم راهنمایی در عربستان را بررسی نمودند. لوپزنری و همکاران (López-Neri, Ramírez-Treviño, & López-Mellado, 2009) با ارائه‌ی یک مدل خرد و تشریح شبکه‌ی ترافیک و پویایی نهادهایی مانند خودروها، چراغ‌ها و مسافران و همچنین با به کارگیری شبکه‌های پتری، چارچوبی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی خرد سیستم‌های ترافیک شهری ارائه دادند. اسمیت و انتزیاکریستوس (Smit, Ntziachristos, & Boulter, 2010) با استفاده از تحلیل‌های آماری، اعتبارسنجی مدل‌های مربوط به ترافیک و خودروها را بررسی کردند. سلیمی فرد و انصاری (Salimifard & Ansari, 2011) نیز در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک شهری به ارائه‌ی مدلی برای شبیه‌سازی چهارراه با استفاده از نرم افزار Arena پرداختند.

بررسی و بازخوانی پژوهش‌های پیشین بیانگر پرشور بودن مسئله ترافیک شهری و مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن با به کارگیری روش‌های گوناگون تحقیق در عملیات است. در این میان، روش شبیه‌سازی یکی از پرهوادارترین و کارآمدترین تکنیک برای مدل‌سازی تجزیه و تحلیل ترافیک شهری است.

برای شبیه‌سازی تعریف‌های زیادی در دست است که هر کدام به نوعی به یک یا چند ویژگی شبیه‌سازی اشاره دارد و هر کدام در جایگاه خود تعریف درستی از شبیه‌سازی می‌باشد. در یک تعریف فراگیر از شبیه‌سازی (Hu, Jiang, Wang, & Wu, 2009) آمده است که شبیه‌سازی طراحی مدلی از سیستم و انجام آزمایش‌هایی روی مدل به منظور دستیابی به شناخت از عملکرد سیستم یا مقایسه عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف است. در یک شبیه‌سازی چند مفهوم کلیدی است. نهاد، یکی از اجزای سیستم است که رفتار یا خواص آن مورد توجه است و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فعالیت، عملی است که در یک فاصله زمانی با طول مشخص بر روی یک نهاد انجام می‌گیرد. وضعیت، حالت سیستم است و بیانگر ارزش متغیرهای سیستم در یک لحظه یا بازه زمانی است. رویداد نیز چیزی است که با رخداد آن سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر می‌رود. امروزه، روش شبیه‌سازی یکی از پرکاربردترین تکنیک‌ها در مهندسی سیستم‌ها و تحقیق در عملیات است و پس از برنامه‌ریزی خطی بیشترین کاربرد را در تحلیل سیستم‌ها دارد. با استفاده از این روش تحلیل‌گر می‌تواند در هر زمان هر تغییری را که لازم بداند، به آسانی در مدل ایجاد نماید و نتیجه‌ی تصمیم خود را پس از اجرای مدل بررسی کند. افزون بر آسانی نسبی کاربرد، یکی دیگر از دلایل علاقمندی پژوهشگران به شبیه‌سازی آن است که بیشتر سیستم‌های دنیای واقعی آنچنان پیچیده هستند که مدل‌سازی آن‌ها با تکنیک‌های بهینه‌سازی، به شدت پیچیده خواهد بود.

اگر چه پژوهش‌های فراوانی در جهان بر روی کنترل چراغ راهنمایی انجام شده است، اما این موضوع همچنان یک چالش پرشور پژوهشی است و پژوهشگران زیادی در تلاش برای دستیابی به بهبود در این زمینه می‌باشند. این مقاله، برای کاراتر سازی به کارگیری چراغ راهنمایی در مدیریت ترافیک شهری در یکی از تقاطع‌های شهر بوشهر، با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین،

www.SID.ir

Archive of SID

رویکردی نو برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تقاطع پیشنهاد می‌دهد. در ادامه، مقاله اینگونه سازماندهی می‌گردد. در زیر بخش بعدی، پیشینه پژوهش‌های مرتبط آورده می‌شود. بخش ۲، به شیوه‌ای فشرده، شبکه‌های پتری رنگین را معرفی می‌نماید و روش‌شناسی و چگونگی مدل‌سازی تقاطع را تشریح می‌کند. در پایان نیز یافته‌های شبیه‌سازی سیستم و نتایج پژوهش در بخش ۳ ارائه می‌گردد.

۲- مواد و روشها

شبکه پتری، یک تکنیک مدل‌سازی برای توصیف سیستم‌های توزیع شده، همزمان[۱] و هم‌جریان[۲] در سطح‌های مختلف انتزاع به شمار می‌روند. شبکه‌های پتری مدل‌هایی از جنبه‌های ساختاری و رفتاری یک سیستم گسسته پیشامد را ارائه می‌دهند. همچنین، این تکنیک چارچوبی برای تحلیل، اعتبارسنجی و ارزیابی کارآیی و قابلیت اطمینان مدل فراهم می‌آورد (Pross & Bachmann, 2009).

یک شبکه پتری یک گراف چندگانه جهت‌دار است که دارای دو عنصر مکان[۳] و گذار[۴] است. مکان‌ها با دایره و گذارها با مستطیل نمایش داده می‌شوند. این دو عنصر با کمان[۵] جهت‌دار به هم پیوند می‌خورند. یک کمان، تنها می‌تواند یک مکان را به یک گذار، یا یک گذار را به یک مکان پیوند دهد. گذارها، بر اساس نیاز می‌توانند نشان دهنده پردازشگرها، رویدادها، گام‌های محاسباتی، و الگوریتم‌ها باشند. مکان‌ها نیز به دو دسته‌ی ورودی و خروجی تقسیم می‌شوند. مکان ورودی، می‌تواند انباره، پیش‌شرط، داده‌ی ورودی، منابع مورد نیاز، شرایط با سیگنال‌های ورودی باشد و مکان خروجی، می‌تواند انباره، پس‌شرط، داده‌ی خروجی، منابع آزاد شده، نتایج یا سیگنال‌های خروجی باشد. شبکه‌های پتری علاوه بر دو عنصر مکان و گذار، دارای عنصر خال[۶] نیز هستند که به صورت یک دایره توپر نمایش داده می‌شود و در مکان‌ها قرار می‌گیرد (Murata, 1989).

زیربنای ریاضی شبکه‌های پتری، زنجیره‌ی مارکوف است. شبکه‌های پتری با بهره‌گیری از ابزاری به نام فضای وضعیت[۷] که در واقع بیانگر فضای وضعیت سیستم است، نشان می‌دهد که با رخداد یک رویداد سیستم از یک وضعیت به چه وضعیت‌های دیگری تغییر می‌یابد. افزون بر این، این ابزار می‌تواند با بررسی همه وضعیت‌ها، وجود وضعیت بن‌بست[۸] در سیستم را نشان می‌دهد. به دلیل توانایی در بررسی وضعیت‌ها و گذارها، این ابزار در واقع یک ابزار اعتبارسنجی مدل است که در تکنیک‌های دیگر مدل‌سازی و شبیه‌سازی موجود نیست. به دیگر سخن، شبکه‌های پتری این توانمندی را دارد تا درستی و اعتبار مدلی که ساخته می‌شود را بسنجد. یکی دیگر از ابزارهای شناسایی بن‌بست در شبکه‌های پتری، اجرای شبیه‌سازی مدل است.

برای اعتبارسنجی مدل به کار رفته در این پژوهش، به دو شیوه عمل گردید. نخست مدل مفهومی و منطقی سیستم طراحی و با خبرگان دانشگاهی و کارشناسان راهنمایی و رانندگی مشورت گردید. پس از تأیید اعتبار مدل منطقی به وسیله خبرگان، از بسته نرم افزاری CPN Tools بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار با ابزارهای مختلف خود کوچکترین خطا در مدل‌سازی را با پیغام‌های مناسب به مدل‌ساز نشان می‌دهد و تا هنگامی که ساختار نهایی مدل با رعایت همه قواعد و پیش فرض‌های شبکه‌های پتری به دست نیاید، مدل را تأیید نمی‌نماید.

نشانه‌گذاری یک شبکه پتری، نگاشتی است که یک عدد نامنفی صحیح (به ازای شمار خال‌ها) را به هر مکان تخصیص می‌دهد (Wei, Mueller, Slovak, & Schnieder, 2009). نشانه‌گذاری، توصیف‌کننده‌ی وضعیت شبکه پتری است. وجود یک یا چند خال، نشان‌دهنده در دسترس بودن منبع یا تکمیل شرط است. نبود شمار خال‌های مورد نظر در یک مکان بیانگر برقرار نبودن شرط یا در دسترس نبودن منبع است. بنابراین، توزیع خال‌ها بر روی مکان‌های شبکه، نشان‌دهنده حالت سیستم هستند.

[1] Concurrency
[2] Synchronization
[3] Place
[4] Transition
[5] Arc
[6] Token
[7] State Space
[8] Deadlock

www.SID.ir

Archive of SID

تغییر در توزیع خال‌ها به وسیله ترتیبی از شلیک شدن گذارها انجام می‌گیرد. با شلیک‌شدن گذارها، نشانه‌گذاری مکان‌ها و در نتیجه وضعیت سیستم تغییر می‌کند. برای شلیک شدن گذارها از قوانینی استفاده می‌شود که گذارهای فعال و غیرفعال را نشان می‌دهد.

شبکه‌های پتری، افزون بر ساختار و تعاریف رسمی، دارای نمایش گرافیکی نیز هستند که فهم آنها را ساده‌تر می‌کند (Iordache & Antsaklis, 2009). اما جدا از این سادگی، نقطه ضعف‌هایی برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های بزرگ و پیچیده با این شبکه‌ها وجود دارد. یکی از زیربخش‌های شبکه‌های پتری، شبکه‌های پتری رنگی می‌باشد که تکنیک اصلی این پژوهش به حساب می‌آید و در ادامه به توضیح این تکنیک پرداخته می‌شود.

ینسن (Jensen, 1994) شبکه‌ی پتری رنگین را به عنوان نسخه‌ی توسعه یافته شبکه پتری کلاسیک معرفی کرد. در این شبکه علاوه بر مکان، گذار و خال از مفاهیم رنگ، گارد[9] و عبارات[10] استفاده می‌شود. در این شبکه‌ها مقادیر داده‌ای با خال‌ها حمل می‌شوند. شبکه‌های پتری رنگی مدل‌های دقیق‌تری از سیستم‌های پردازشی غیرهمزمان پیچیده ارائه می‌دهند. در این شبکه‌ها بر خلاف شبکه‌های پتری، خال‌ها با داشتن صفت رنگ از یکدیگر قابل تمیز هستند. در توصیف رسمی، یک شبکه پتری رنگین یک نه‌گانه است که به صورت زیر تعریف می‌شود (Jensen, 1994):

$$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I) \quad (۱)$$

که در آن:

- Σ یک مجموعه متناهی و ناتهی از رنگ‌ها است؛
- P یک مجموعه متناهی از مکان‌هاست؛
- T یک مجموعه متناهی از گذارهاست،
- A یک مجموعه متناهی از کمان‌هاست به گونه‌ای که $P \cap T = T \cap A = T \cap A = \varnothing$.
- N یک تابع گره است. این تابع از A به $P \times T \cup T \times P$ تعریف می‌شود.
- C یک تابع رنگ است. این تابع از P به Σ است.
- G یک تابع گارد است. این تابع از T به عبارت‌هایی است که
$$\forall t \in T : \left[Type(G(t) = Bool \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma \right]$$
- E یک تابع عبارت کمان است. این تابع از A به عبارت‌هایی است به گونه‌ای که
$$\forall a \in A : \left[Type(E(a)) = C(p(a)_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma \right]$$
که در آن $p(a)$ مکانی از $N(a)$ است.
- I تابع آغازین است. این تابع از P به عبارت‌های بسته‌ای است به گونه‌ای که
$$\forall p \in P : \left[Type(I(p)) = C(p)_{MS} \right]$$

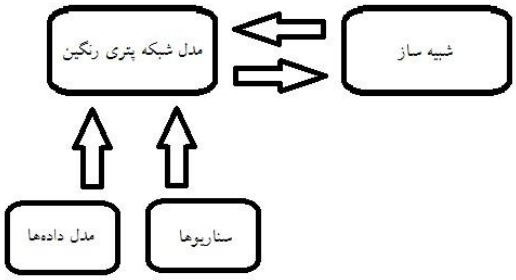
یکی از مفاهیمی که در شبیه‌سازی سیستم‌ها مورد توجه است زمان می‌باشد. در شبکه‌های پتری رنگین مفهوم زمان با به کارگیری عنصری به نام ساعت همگانی[11] است. مقادیری که این ساعت به خود می‌گیرد بیانگر زمان در مدل است. بدین معنی که مثلاً اگر مقدار ساعت ۲۵۳ باشد، بدین معنی است که تا کنون ۲۵۳ واحد زمان گذشته است. این زمان می‌تواند یک عدد صحیح باشد که نشانگر زمان گسسته است یا می‌تواند یک عدد حقیقی باشد که بیان‌کننده زمان پیوسته است (Ansari, 2011).

[9] Guard
[10] Expression
[11] Global Clock

www.SID.ir

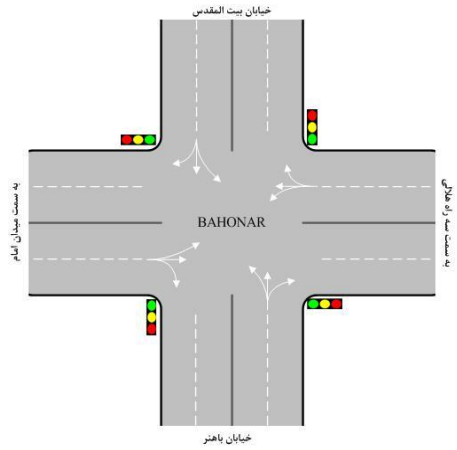
Archive of SID

این پژوهش بر آن است که با معرفی رویکردی نو در مدل‌سازی چهار راه با شبکه‌های رنگین پتری زمانمند، یکی از چهارراه‌های پر آمد و شد شهر بوشهر را مدل‌سازی و شبیه‌سازی کند. همانگونه که در مدل مفهومی در شکل شماره (۱) نشان داده شده است، در رویکرد پیشنهادی نخست، یک مدل شبکه پتری رنگین از چهارراه تهیه می‌شود.



شکل شماره (۱): مدل مفهومی سیستم

با گردآوری داده‌ها از دنیای واقعی، مدل داده‌ها تهیه و بر روی مدل شبکه پتری رنگین از سیستم توزیع می‌گردد. با به کارگیری بسته نرم‌افزاری CPN tools (CPN, 2011)، مدل شبیه‌سازی می‌شود. افزون بر این به ازای هر سیاست کنترلی یک سناریو تعریف و مدل بر اساس آن شبیه‌سازی می‌گردد.

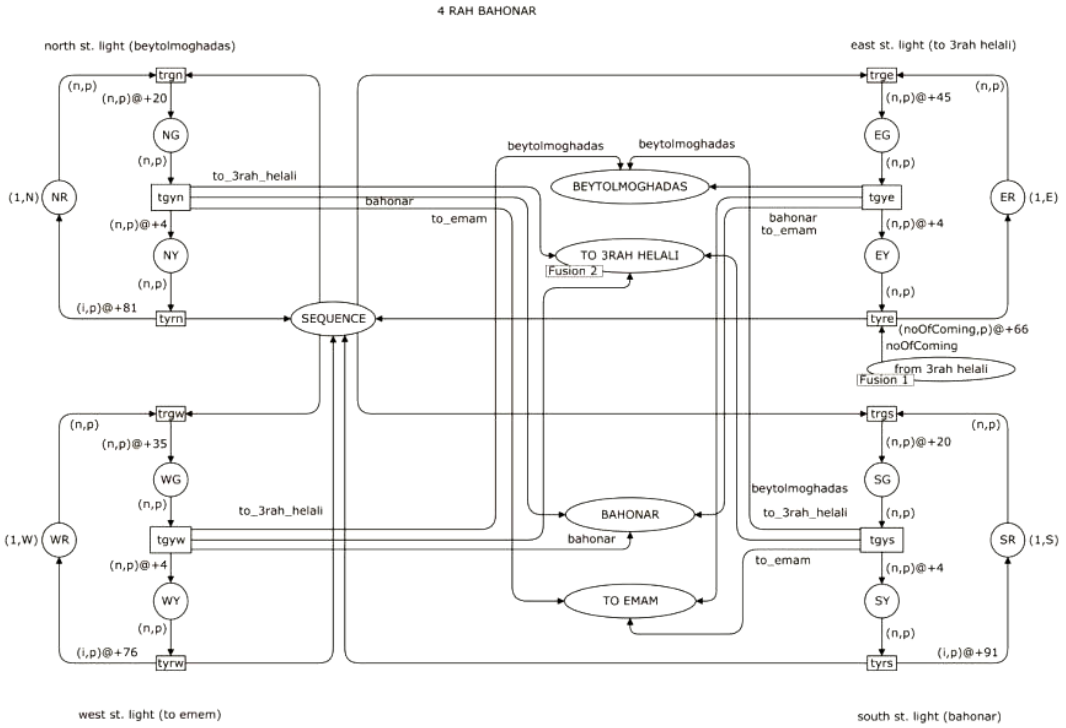


شکل شماره (۲): نمای کلی چهارراه باهنر

همانگونه که در شکل شماره (۲) دیده می‌شود چهارراه باهنر از شمال به خیابان بیت‌المقدس، از شرق به سه‌راه هلالی، از جنوب به خیابان باهنر و از غرب به میدان امام می‌پیوندد. در این چهارراه، چهار چراغ راهنمایی وجود دارد که هر کدام دارای زمان‌های از پیش تعیین شده متفاوتی نسبت به هم می‌باشند. با ورود خودرو به چهارراه و در صورت سبز بودن چراغ، خودرو می‌تواند به هر یک از سه سوی راست، مستقیم و چپ برود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل شماره (۳): مدل شبکه پتری رنگین برای چهارراه باهنر

مدل شبکه پتری رنگین برای چهارراه باهنر در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. در این مدل از ۱۸ مکان و ۱۲ گذار استفاده شده است که از این تعداد، ۱۲ مکان و گذار برای مدل‌سازی چراغ‌های راهنمایی، ۵ مکان برای مدل‌سازی آمد و شد خودروها، و یک مکان نیز برای مدل نمودن توالی اجرای چراغ‌ها می‌باشد. در ادامه، توضیح شکل شماره (۳) در قالب سه بخش چراغ‌های راهنمایی، گردش اجرای خودروها و آمد و شد خودروها، که از عناصر اصلی مدل ساخته شده می‌باشند، آورده می‌شود.

الف) چراغ‌های راهنمایی

این چهارراه دارای چهار چراغ راهنمایی می‌باشد. هر کدام از چراغ‌ها با ۳ مکان و ۳ گذار مدل شده است. هر مکان نشانگر یکی از رنگ‌های سبز، زرد و قرمز می‌باشد. نام هر چراغ بر روی مدل نگاشته شده است. برای مثال، چراغ خیابان باهنر در سمت راست و پایین مدل، South st., Light (Bahonar) نامگذاری شده است. مکان‌های SR، SG و SY به ترتیب بیانگر وضعیت‌های سرخ، سبز، و زرد این چراغ می‌باشند. مدت زمان وضعیت‌های سه گانه هر چراغ در دنیای واقعی نیز اندازه‌گیری و در این مدل جاگذاری گردیده است. برای مثال، مدت زمان سبز بودن چراغ خیابان باهنر ۲۰ ثانیه و سرخ بودن آن ۸۱ ثانیه می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود این مدت زمان‌ها با نماد 20+@ و 81+@ بر روی مدل نشان داده شده است. بر روی هر کمان عبارت دو متغیری (n,p) نشان داده شده است که n بیانگر شمار خودروها و p بیانگر نوع خودروها می‌باشد. گذار میانی مکان‌های سبز و زرد هر چراغ، گذار شاخه‌زنی است. این گذار، خودروهای گذرنده از چراغ را به سه مسیر راست، مستقیم، و چپ مختلف می‌فرستد. برای نمونه، گذار tgys که میان مکان‌های SG و SY است، خودروهای ورودی از خیابان باهنر را به سه مسیر خیابان بیت‌المقدس، سه‌راه هلالی و میدان امام پخش می‌کند. شمار خودروهای پخش شده در هر یک از مسیرهای سه گانه با فراخوان یک تابع توزیع احتمال برآورد می‌گردد.

ب) گردش اجرای چراغ‌ها

برای پیشگیری از برخورد خودروها، روش کار چراغ‌های راهنمایی در یک چهارراه واقعی اینگونه است که اگر یک چراغ سبز باشد دیگر چراغ‌ها باید سرخ باشند. بی‌گمان، یکی از نیازمندی‌های واقعی بودن مدل، پیاده‌سازی این شرط می‌باشد. مکان SEQUENCE در مدل این نقش را بازی می‌کند. هر یک از گذارهایی که نقش تغییر رنگ چراغ از سرخ به سبز را دارند،

www.SID.ir

Archive of SID

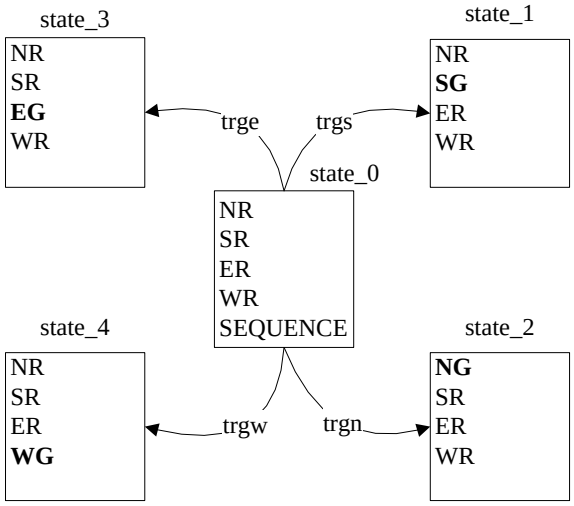
نیازمند وجود یک خال در SEQUENCE است. این بدان معنی است که با شلیک یکی از گذارهای trgn، trgs، trge، و trgw، خال موجود در SEQUENCE مصرف می‌شود و دیگر گذارها، تا جاگذاری خال بعدی در SEQUENCE امکان‌پذیر نشده و شلیک نخواهند شد. به دیگر سخن، این چهار گذار با هم در تضاد هستند و شلیک یکی، شلیک شدن سه گذار دیگر را ناشدنی می‌سازد.

ج) آمد و شد خودروها

برون رفت خودروها از چهار راه به هر یک از چهار خیابان خروجی چهار راه است. برای هر خیابان خروجی یک مکان بیانگر خودروهای خروجی از چهار راه به آن خیابان است. برای نمونه Beytolmoghadas برای مدل نمودن خودروهای خروجی به سوی خیابان بیت‌المقدس است. به همینسان، مکان‌های To Helali Bahonar T Junction، و To Emam نیز برای سه خیابان دیگر به کار رفته‌اند. این مکان‌ها نشان‌دهنده‌ی مقصد خودروهایی هستند که از چراغ گذر می‌کنند. روال کار اینگونه است که هر خودرو پس از تعیین مسیر خود، با توجه به عبارات و پیش شرط‌هایی که روی هر کمان و در ناحیه‌ی کدنویسی اعمال می‌شود، به یکی از این چهار مکان وارد می‌شود. ورود خال خودرو به هر یک از این چهار مکان مدل، بیانگر ورود خودرو به خیابان همسان آن در دنیای واقعی است.

د) اعتبار سنجی مدل

یک مدل هنگامی می‌تواند پایه‌ای استوار برای تجزیه و تحلیل باشد که مدل‌ساز بتواند نشان دهد که مدل، یک ارائه شایسته و معتبر از سیستم واقعی است. همانگونه که پیشتر گفته شد، شبکه‌های پتری برای اعتبار سنجی مدل، ابزارهای کارآمدی در دسترس مدل‌ساز می‌گذارد. یکی از ابزارهای اعتبارسنجی، گراف رخداد[۱۲] است. ایده این گراف، در واقع، ساخت گرافی است که دربرگیرنده یک گره برای هر وضعیت قابل دسترس و نیز کمان‌هایی است که بیانگر گذار از یک وضعیت به وضعیت‌های دسترس‌پذیر است. در شکل شماره (۴) بخشی از گراف رخداد برای شبکه شکل (۳) نشان داده شده است. در این گراف، سیستم در آغاز در وضعیت state_0 است که در آن مکان‌های NR، SR، ER، WR، و SEQUENCE دارای خال هستند. این بدان معنی است که هر ۴ چراغ در وضعیت آغازین به رنگ سرخ هستند و یک خال نیز در SEQUENCE به معنی آماده بودن سیستم برای تغییر وضعیت است.



شکل شماره (۴): بخشی از گراف رخدادهای شبکه

[12] Occurrence Graph (OG)

www.SID.ir

Archive of SID

با شلیک گذار *trgs* سیستم از وضعیت state_0 به وضعیت state_1 گذر می‌کند. در این وضعیت، چراغ جنوبی (خیابان باهنر) سبز شده و سه چراغ دیگر همچنان سرخ می‌باشند. پیامد این شلیک این است که دیگر خالی در SEQUENCE نیست. این نبود خال از شلیک شدن گذارهایی که چراغ‌های دیگر را به رنگ سبز تغییر می‌دهند، پیشگیری می‌نماید. این رفتار مدل، با رفتار سیستم واقعی، همسان است و بیانگر اعتبار آن می‌باشد. برای بررسی اعتبار مدل، گراف رخداد کامل شبکه ساخته شده و همه وضعیت‌های شدنی و نیز گذار میان آن‌ها بررسی گردید.

۳- نتایج و بحث

چگونگی مدل‌سازی چهار راه در بخش پیشین آورده شد. در این بخش یافته‌های شبیه‌سازی مدل آورده می‌شود. این یافته‌ها در برگیرنده میانگین شمار خودروها در پشت هر چراغ می‌باشد. همانگونه که پیشتر گفته شد، مدل شبکه پتری رنگین این سیستم، بر روی بسته نرم‌افزاری CPN Tools (CPN, 2011) پیاده‌سازی گردید و با به کارگیری ماجول شبیه‌سازی، نتایج شبیه سازی در جدول شماره (۱) آورده شده است. برای مثال دیده می‌شود که به طور میانگین ۱۲ خودرو در پشت چراغ سرخ خیابان باهنر منتظر هستند. این میانگین برای خیابان بیت‌المقدس ۹ خودرو می‌باشد. همچنین، این جدول نشان می‌دهد که به طور میانگین ۲۳ خودرو در این چهارراه منتظر هستند.

یکی از مهم‌ترین سیاست‌های کنترلی در شبکه حمل و نقل شهری، تعیین مدت زمان سبز یا سرخ بودن چراغ‌های راهنمایی است. تغییر مدت زمان چراغ‌ها به دو شیوه ثابت و متغیر می‌باشد. در شیوه ثابت، مدت زمان هر یک از وضعیت‌های سه گانه چراغ‌ها بدون توجه به چگونگی آمد و شد خودروها و در هر شرایط ترافیکی، ثابت است. در شیوه دوم، این مدت زمان بر اساس چگونگی جریان آمد و شد خودروها تغییر می‌کند.

مکان چراغ	میانگین
چراغ شمالی، خیابان بیت المقدس	۹
چراغ شرقی، به سمت سه‌راه هلالی	۳۶
چراغ جنوبی، خیابان باهنر	۱۲
چراغ غربی، به سمت میدان امام	۳۴
میانگین	۲۲.۷۵

جدول شماره (۱): میانگین شمار خودروها پشت هر چراغ

در این پژوهش و بر اساس آنچه که اینک در چهار راه یاد شده انجام می‌شود، سیاست کنترلی مدت زمان ثابت در نظر گرفته شده است. این شیوه به عنوان یک سیاست کنترلی بر روی مدل شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. جدول شماره (۲) سناریوهای تعریف شده بر روی مدل شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

سناریو نخست: وضعیت کنونی
سناریو دوم: افزایش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه
سناریو سوم: کاهش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۲۵ ثانیه
سناریو چهارم: افزایش هم زمان مدت زمان چراغ شرقی چهارراه باهنر از ۴۵ ثانیه به ۵۰ ثانیه و چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه
سناریو پنجم: کاهش زمان سبز بودن چراغ شرقی چهارراه باهنر از ۴۵ ثانیه به ۳۵ ثانیه

جدول شماره (۲): سناریوهای کنترلی

www.SID.ir

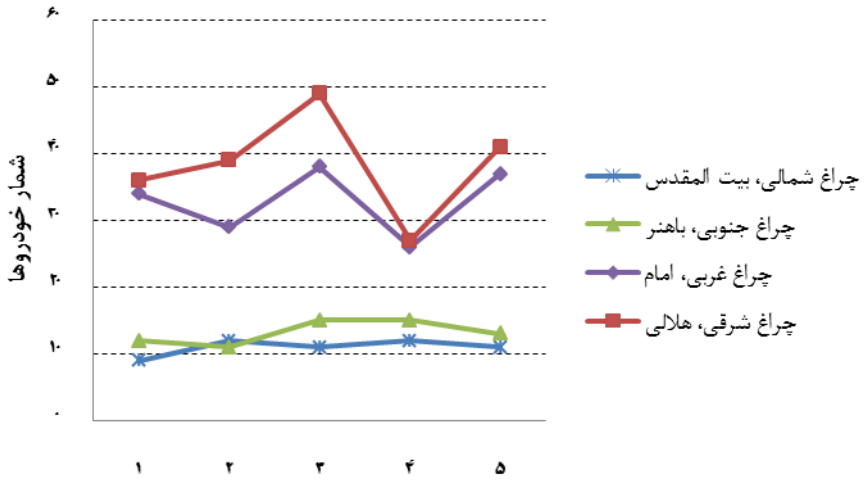
Archive of SID

با شبیه‌سازی هر یک از سناریوهای یاد شده در جدول شماره (۲)، تأثیر آن‌ها بر روی سیستم بررسی می‌گردد. برای نمونه در جدول (۳)، اثر تغییر در مدت زمان سبز بودن چراغ‌ها بر میانگین شمار خودروها در پشت هر چراغ نشان داده شده است. در این جدول اثر هر یک از پنج سناریو بر روی چراغ‌ها نشان داده شده است. برای هر سناریو دو ستون تعریف شده است که یکی از آن‌ها نشان دهنده مدت زمان چراغ، و دیگری نشان دهنده طول صف خودروها در پشت چراغ می‌باشد. سناریو ۱ بیانگر وضعیت کنونی سیستم است.

همانگونه که در جدول شماره (۳) دیده می‌شود، در وضعیت کنونی میانگین شمار خودروها در پشت چراغ شرقی چهارراه باهنر ۳۶ خودرو می‌باشد. با انجام سناریو دوم (یعنی افزایش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه)، این میانگین به عدد ۲۹ کاهش می‌یابد. این سناریو همچنین به تغییر در میانگین دیگر مسیرها رهنمون می‌شود. این تغییرات در جدول شماره (۳) نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود که به کارگیری هر سناریو باعث تغییراتی در میانگین شمار خودروها می‌شود. نمودار شکل شماره (۴) عملکرد سیستم را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

مسیرهای چهارراه	سناریو									
	۵		۴		۳		۲		۱ (وضعیت کنونی)	
	طول صف (تعداد)	زمان چراغ (ثانیه)	طول صف (تعداد)	زمان چراغ (ثانیه)	طول صف (تعداد)	زمان چراغ (ثانیه)	طول صف (تعداد)	زمان چراغ (ثانیه)	طول صف (تعداد)	زمان چراغ (ثانیه)
چراغ شمالی، بیت المقدس	۱۱	۲۰	۱۲	۲۰	۱۱	۲۰	۱۲	۲۰	۹	۲۰
چراغ شرقی، هلالی	۴۱	۳۵	۲۷	۵۰	۴۹	۴۵	۳۹	۴۵	۳۶	۴۵
چراغ جنوبی، باهنر	۱۳	۲۰	۱۵	۲۰	۱۵	۲۰	۱۱	۲۰	۱۲	۲۰
چراغ غربی، امام	۳۷	۳۵	۲۶	۴۵	۳۸	۲۵	۲۹	۴۵	۳۴	۳۵

جدول شماره (۳): میانگین شمار خودرو در پشت هر چراغ



شکل شماره (۵): عملکرد سیستم با اجرای سناریوهای گوناگون

www.SID.ir

Archive of SID

شناخت گلوگاه در شبکه‌های ترافیکی یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی سیستم می‌باشد. این شناخت دیدی گسترده از سیستم ارائه می‌دهد و نقاط بهبود شدنی را برای تصمیم گیرندگان مشخص می‌نماید. همانگونه که در جدول (۳) دیده می‌شود، مسیرهای شرقی (هلالی) و غربی (امام) چهارراه دارای بیشترین شمار خودروهای منتظر می‌باشند. به دیگر سخن، در وضعیت کنونی، این دو مسیر، گلوگاه سیستم می‌باشند. از این رو، کاهش شمار خودروهای منتظر در این دو مسیر از اولویت بالایی برخوردار است. نمودار شکل (۵) به خوبی نشان می‌دهد که سناریو شماره ۴ دارای بهترین عملکرد در مسیرهای شرقی و غربی است و طول صف خودروها از وضعیت کنونی (سناریو ۱) بسیار کمتر است. در واقع، این سناریو توانسته است میانگین شمار خودروها در مسیرهلالی و امام را به ترتیب ۲۵٪ و ۲۳/۵٪ کاهش دهد. باید یادآور گردید که مسیر شرق به غرب، و نیز غرب به شرق این چهار راه یکی از مسیرهای مهم و اصلی آمد و شد خودروها در شهر بوشهر است و هر گونه بهبود در آن می‌تواند اثر شگرفی بر سیستم آمد و شد درون شهری بوشهر داشته باشد.

البته اگر چه این سناریو در دو مسیر دیگر (بیت‌المقدس و باهنر) میانگین شمار خودروها را به ترتیب ۳۳٪ و ۲۵٪ افزایش داده است، ولی با توجه به اینکه این دو خیابان نسبت به دو خیابان دیگر فرعی هستند و مسیر اصلی رفت و آمد خودروها نمی‌باشد، این افزایش تأثیر منفی شگرفی بر عملکرد کلی سیستم ندارد. از اینرو، سناریو شماره ۴ به عنوان سناریو برتر کنترلی چراغ‌های راهنمایی چهارراه پذیرفته می‌شود.

با اجرای سناریوهای مختلف می‌توان تغییر در شمار خودروها در پشت هر چراغ را بررسی نمود. این بدان معنی است که با اجرای این روش می‌توان روان بودن آمد و شد خودروهای هر مسیر را کنترل کرد. بدین شیوه که با تغییر در زمان فعال بودن چراغ‌ها، بار ورودی و خروجی هر مسیر بررسی می‌گردد. این مقاله نشان داد در یک دنیای واقعی و پیچیده، شبکه‌های پتری رنگین توانایی مدل‌سازی ترافیک شهری را دارا است. آشکار است که با وجود امکانات رایانه‌ای و پردازشی، امکان مدل‌سازی و شبیه‌سازی بخش‌های بزرگتری از شبکه آمد و شد شهری و حتی همه شبکه ترافیکی شهر نیز وجود خواهد داشت.

همانگونه که پیشتر گفته شد، مدیریت آمد و شد خودروها یکی از چالش‌های مهم در شبکه‌های حمل و نقل شهری است. چراغ راهنمایی ابزاری است که با اجرایی نمودن سیاست‌های کنترلی، می‌تواند کمک شایانی در آمد و شد خودروها نماید. تعیین مدت زمان هر یک از وضعیت‌های چراغ می‌تواند اثرهای متفاوتی بر جریان آمد و شد خودروها و در نتیجه بر کل شبکه ترافیک شهری داشته باشد. در این مقاله برای تعیین سناریو کنترلی مناسب، رویکردی بر پایه شبکه‌های پتری رنگین برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم چراغ راهنمایی پیشنهاد شده است. با به کارگیری رویکرد پیشنهادی، یکی از چهارراه‌های شهر بوشهر مدل‌سازی گردید. با استفاده از شبیه‌سازی، سناریوهای مختلف کنترلی بر روی مدل پیاده‌سازی شد و تأثیر هر سناریو بر عملکرد چهارراه ارزیابی گردید. بر اساس یافته‌های شبیه‌سازی، یکی از سناریوهای کنترلی به عنوان بهترین سناریو انتخاب شد. افزون بر یافته‌های یاد شده، این پژوهش توانمندی رویکرد پیشنهادی برای مدل‌سازی ترافیک شهری را نشان می‌دهد. در یک بررسی فراگیر، با استفاده از رویکرد پیشنهادی در این مقاله، بخشی از شبکه ترافیک شهر بوشهر مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید. در مطالعه آینده، افزون بر مدل‌سازی سیاست‌های کنترلی چراغ‌های راهنمایی، رویدادهایی مانند تصادف، راه‌بندان، و اشغال شدن یک یا چند باند از خیابان نیز به مدل افزوده شده و پیامدهای آن‌ها بر روی سیستم ارزیابی و حساسیت مدل به هر یک از این رویدادها ارزیابی می‌گردد.

۴- منابع

1- Ansari, M. (2011). Modeling and simulation of urban traffic using Colored Petri Nets. Bushehr: Persian Gulf University.

2- Avineri, E. (2005). Soft Computing Applications in Traffic and Transport Systems: A Review. Advances in Soft Computing (1), 17-25.

3- CPN. (2011). CPN Tools Web site. Retrieved from http://www.cpntools.org.

4- De Jong, G., & Daly, A. (2007). Uncertainty in Traffic Forecasts: Literature Review and New Results for The Netherlands. Transportation, 34, 375–395.

www.SID.ir

Archive of SID

5- De Oliveira, L., & Camponogara, E. (2010). Multi-Agent Model Predictive Control Of Signaling Split In Urban Traffic Networks. Transportation Research Part C, 120–139.
6- Di Febbraro, A., & Sacco, N. (2002). On Applying Petri Nets To Determine Optimal Offsets For Coordinated Traffic Light Timing. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Singapore.
7- Dotoli, M., & Fanti, M. (2009). Validation of an Urban Traffic Network Model Using Colored Timed Petri Nets. IEEE Proceedings.
8- Farhi, N., Goursat, M., & Quadrat, J. (2009). Road Traffic Models Using Petri Nets and Minplus Algebra. TRAFFIC AND GRANULAR FLOW ’07, Part I, (pp. 281-286).
9- Helbing, D. (2002). Micro and Macro-Simulation of Freeway Traffic. Mathematical and Computer Modelling (35), 517-547.
10- Hounsell, N., & Shrestha, B. (2009). Review of Urban Traffic Management and the Impacts of New Vehicle Technologies. The Institution of Engineering and Technology, 3(4), 419–428.
11- Hu, M., Jiang, R., Wang, R., & Wu, Q. (2009, May 25). Urban Traffic Simulated From The Dual Representation: Flow, Crisis and Congestion. Physics Letters A, 373(23-24), 2007-2011.
12- Huaitien, W., & List, F. (2009). Modeling and Evaluation of Traffic Signal Control Using Timed Petri Nets. Proceeding In The IEEE.
13- Huang, Y., & Chung, T. (2006). A New Modeling Methodology Of Urban Traffic Lights Based On Timed Coloured Petri Nets. IEEE International Conference on Systems, Man, And Cybernetics. Taiwan.
14- Huang, Y., & Chung, T. (2006, October 4-6). A Timed Coloured Petri Net Supervisor for Urban Traffic Networks. Imacs Multi conference on Computational Engineering in Systems Applications (Cesa).
15- Huang, Y., & Chung, T. (2006). Design And Analysis Urban Traffic Lights Using Timed Colour Petri Nets. IEEE Proceedings.
16- Iordache, M., & Antsaklis, P. (2009). Petri Nets and Programming: A Survey. Proceedings of the 2009 American Control Conference (pp. 4994-4999). St. Louis, USA: IEEE.
17- Jensen, K. (1994). An Introduction to the Theoretical Aspects Of Coloured Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science, 803, 230-272.
18- Li, J., & Li, Q. (2008). Modeling Of Urban Traffic System Based On Dynamic Stochastic Fluid Petri Net. Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PIETS 08) (pp. 485-491). Guangzhou, China: IEEE.
19- Li, L., Lin, W., & Liu, H. (2005). Traffic Signal Priority/Preemption Control with Colored Petri Nets. Proceedings Of The 8th International IEEE Conference On Intelligent Transportation Systems. Austria.
20- Lin, L., Tang, N., Mu, X., & Shi, F. (2003). Implementation Of Traffic Lights Control Based On Petri Nets in Intelligent Transportation Systems. IEEE Proceedings (2), 1087-1090.
21- List, G., & Cetin, M. (2004). Modeling Traffic Signal Control Using Petri Nets. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 5(3).
22- López-Neri, E., Ramírez-Treviño, A., & López-Mellado, E. (2009). A Modeling Framework for Urban Traffic Systems Microscopic Simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 1145-1161.

www.SID.ir

Archive of SID

23- Murata, T. (1989). Petri nets: properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE (77), 541-580.
24- Pross, S., & Bachmann, B. (2009). A Petri Net Library for Modeling Hybrid Systems in Openmodelica. Proceedings 7th Modelica Conference, (pp. 454-462). Italy.
25- Rahman, S., & Ratrout, N. (2009). Review of the Fuzzy Logic Based Approach in Traffic Signal Control: Prospects in Saudi Arabia. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 9(5), 58-70.
26- Rahman, S., & Ratrout, N. (2009). Review of the Fuzzy Logic Based Approach in Traffic Signal Control: Prospects in Saudi Arabia. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology (JTSEIT), 9(5), 58-70.
27- Salimifard, K., & Ansari, M. (2011). Modeling and Simulation of Urban Traffic Signals. 3rd International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS 2011), (pp. 323-327). Chengdu, China.
28- Shabani, S. (2008). Presenting a model of square design using traffic behavior simulation when entrance it. Tehran: Iran University of Science and Technology.
29- Smit, R., & Ntziachristos, L. (2010). Validation of Road Vehicle and Traffic Emission Models – A Review. Atmospheric Environment.
30- Smit, R., Ntziachristos, L., & Boulter, P. (2010). Validation of Road Vehicle and Traffic Emission Models – A Review. Atmospheric Environment, 44(25), 2943-2953.
31- Soares, M., & Vrancken, J. (2007). Road Traffic Signals Modeling and Analysis with Petri Nets And Linear Logic. Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. London.
32- Soares, M., & Vrancken, J. (2008). Responsive Traffic Signals Designed With Petri Nets. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (pp. 1942-1947).
33- Tolba, C., & Lefebvre, D. (2003). Performances Evaluation Of The Traffic Control In A Single Crossroad By Petri Nets. Proceedings of IEEE.
34- Wang, J., Jin, C., & Deng, Y. (1999). Performance Analysis Of Traffic Networks Based On Stochastic Timed Petri Net Models. Fifth IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS '99), (pp. 77-85). Las Vegas, NV.
35- Wei, Z., Mueller, J., Slovak, R., & Schnieder, E. (2009). Estimation of Traffic Risk of Level Crossing Based On Stochastic Petri Nets Models and Social Economic Data. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 3, 518-521. IEEE.
36- Yu Chou, C., & Chung, H. (2001). Application of Computer Simulation to the Design of a Traffic Signal Timer. Computers & Industrial Engineering (39), 81-94.
37- Zhang, Y., & Houli, D. (2007). Modeling Mixed Traffic Flow at Crosswalks in Micro-Simulations Using Cellular Automata. Tsinghua Science and Technology, 12(2), 214-222.

www.SID.ir