پیش‌بینی و کنترل هوشمند چراغ‌های راهنمایی با استفاده از الگوریتم هوش مصنوعی خودکار یادگیر

(مقاله پژوهشی) (صفحه ۱-۳۶)

محمدامین ترابی[۱]، فائزه رحمانی[۲]، تحفه قبادی لموکی[۳]، حسین حاجی بابایی[۴]، مجید فانی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

چکیده

زمینه و هدف: کنترل تقاطع‌ها با استفاده از چراغ‌های راهنمایی به روش بهینه‌شده، کار بسیار دشواری است. سیستم کنترل هوشمند چراغ راهنمایی با استفاده از فناوری‌های راهنمایی و رانندگی همراه با هوش مصنوعی با تصمیم‌گیری مناسب مشکلات ترافیکی مانند ازدحام را برطرف می‌کند. روش‌های یادگیری تقویتی به‌ویژه الگوریتم خودکار یادگیر می‌توانند فقط با دریافت سیگنال از محیط تصمیم بگیرند. هدف این مقاله، ارائه برخی از روش‌های مبتنی بر الگوریتم خودکار را برای پیش‌بینی و کنترل چراغ راهنمایی هوشمند با استفاده از انواع الگوریتم‌های خودکار از جمله روش‌های ساکن و متغیر است.

روش: روش تحقیق حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، شبیه‌سازی-مشاهده‌ای است. تکنیک و روش مورد استفاده در این پژوهش، استفاده ترکیبی از روش الگوریتم خودکار یادگیر است. جهت این‌کار، ترافیک بر روی چهارراه‌های منطقه یک در شهر همدان، بررسی و از آن داده‌ها جهت ارزیابی و نتایج بهره گرفته شد.

۱. گروه مدیریت، اقتصاد و حسابداری، دانشگاه پیام نور، تهران، نویسنده مسئول: Torabi628@gmail.com
۲. کارشناسی ارشد مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه پیام نور تهران، rahmanif69@yahoo.com
۳. استادیار مدیریت بازرگانی، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، tohfehghobadi136205@gmail.com
۴. دکتری مدیریت بازرگانی، دانشگاه آزاد اسلامی همدان، h20hajibabaei@gmail.com
۵. استادیار، گروه مدیریت بازرگانی، واحد بابل، دانشگاه آزاد اسلامی، بابل، ایران، fani@baboliau.ac.ir

یافته‌ها: آزمایش‌ها نشان داد که الگوریتم خودکار دارای ساختار متغیر در اکثر موارد بهتر از الگوریتم خودکارهای دیگر عمل می‌کند و درنهایت روش پیشنهادی با الگوریتم‌های مختلف قابل مقایسه است و توانایی بهبود ترافیک در شهر را دارا است.

نتیجه‌گیری: روش پیشنهادی برای هر چراغ راهنمایی، سیکل بعدی را پیش‌بینی کرده است که در این حالت، چهارراه، با کمترین ترافیک موجود مواجه خواهد شد، این سیکل بلادرنگ بوده و ممکن است در دوره بعدی، توالی آن تغییر پیدا کند و به سمت بهینه‌سازی الگوریتم خودکار عمل کند، سامانه اجراشده، به‌طوری عمل می‌کند که با مرور زمان و با یادگیری بیشتر، آموزش دیده و کامل‌تر و با دقت بیشتری عمل می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ترافیک شهر همدان، چراغ‌های راهنمایی هوشمند، یادگیری تقویتی و الگوریتم خودکار یادگیر، هوش مصنوعی.

مقدمه

در جهان امروز، به‌دلیل پیچیده‌شدن شرایط و افزایش بسیار متغیرها، افراد و سازمان‌ها با موقعیت‌ها و مسائلی روبه‌رو می‌شوند که تصمیم‌گیری در مورد آنها با نگاه تک بعّدی میسر نیست. در این شرایط، بهره‌گیری از تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌تواند ضریب خطای تصمیم‌های انسانی را به‌طور محسوسی کاهش دهد و تصمیم‌های مهم مدیریت شهری را در حد خبرگی، انتخاب و اجرا کند (حامدی، ترابی، رفیعی‌نیا و اسفندیاری، ۱۳۹۹، ص ۳). روش‌های الگوریتم خودکار یادگیر، یکی از مهم‌ترین ابزار کارآمد هوش مصنوعی برای یادگیری ماشین و ارتقای آن در حد سیستم‌های خبره[1] است (قوی‌پور و میبدی، ۲۰۱۶، ص ۵).

الگوریتم خودکار یادگیر بر پایه تجربه‌ای که در تعامل با محیط به‌دست می‌آورد، سعی می‌کند با تصحیح روش آزمون و خطای اعمال مختلف به سمت جواب بهینه عمومی

1. DSS (Decision Support System)

حرکت کند (مهدویانی، کردستانی، رضوانیان و میبدی، ۲۰۱۵، ص ۴). از دیدگاهی دیگر، الگوریتم خودکار یادگیر، شناسایی اصول و الگوریتم‌های یادگیری در موجودات زنده و در ادامه به‌کارگیری و پیاده‌سازی این اصول و الگویتم‌ها در ماشین‌ها است (فرح‌بخش، شهیدی‌نژاد و قبایی‌آرانی، ۲۰۲۱، ص ۴).

مدل‌های الگوریتم خودکار یادگیر در دهه شصت میلادی مورد توجه قرار گرفت. در سال‌های اخیر، به‌منظور افزایش کاربردهای الگوریتم خودکار یادگیر، تغییراتی در مدل‌های آن ایجاد شد و پس از آن سیستم‌های مبتنی بر الگوریتم خودکار در موقعیت‌های متنوعی مورد استفاده قرار گرفت (اواستین و کالتاو[1]، ۲۰۲۱، ص ۳). یکی از موقعیت‌هایی که استفاده از الگوریتم خودکار یادگیری در آن پیشنهاد می‌شود، به‌کارگیری این شیوه در طراحی شهری، جانمایی ماشین‌ها و غیره در ساختار شهری است. که در این میان، ارائه راه‌کاری بهینه برای کنترل ترافیک شهری به‌عنوان یکی از مسائل مهم و پیچیده شهرها حائز اهمیت فراوان است (وحید، کریشنا، گیتانجالی، سادون و اوبیدات[2]، ۲۰۲۱، ص ۱۶؛ نارندا، رایت و مایسون[3]، ۱۹۹۷، ص ۶؛ کومار، میسرا و اوبایدات[4]، ۲۰۱۴، ص ۱۴). اما بیشتر سیستم‌های کنترل ترافیک در ایران از رویه‌های ثابت و قدیمی استفاده می‌کنند که پاسخ‌گوی جمعیت و شرایط ایران نیست (خراسانی‌زواره و شریفیان، ۲۰۱۷، ص ۵). با استفاده از یادگیری الگوریتم خودکار می‌توان سیستم ترافیکی شهرها، ازجمله مدیریت چراغ‌های راهنمایی را به شکل بهینه‌ای طراحی کرد. اتخاذ استراتژی‌های بلادرنگ و متناسب با تغییرات محیط، زمان انتظار در پشت چراغ‌ها را ۵ تا ۱۵درصد کاهش می‌دهد (پراشان و بانتاگار[5]، ۲۰۱۱، ص ۱۲). چنان‌چه توالی سیگنال ترافیک و مدت زمان

1. Evsutin & Kultaev
2. Waheed, Krishna, Gitanjali, Sadoun & Obaidat
3. Narendra,Wright & Mason
4. Kumar, Misra & Obaidat
5. Prashanth & Bhatnagar

چراغ‌های راهنمایی با توجه به متغیرهای موجود در محیط، به درستی کنترل و مدیریت شوند، تاثیر چشم‌گیری بر روان‌شدن عبور و مرور،کاهش ازدحام و افزایش کارآیی افراد و درنهایت کاهش فشارهای روحی خواهد داشت (رز، پراساس و مک‌شان[1]، ۲۰۱۱، ص ۱۷).

باتوجه به این‌که ساختار ترافیکی شهر همدان، به‌صورت دایره‌ای (محصور در رینگ اول و دوم وسوم)، طراحی شده است و در طی سالیان متمادی نیز، توسعه آن نیز براساس شعاع دایره‌ای انجام گرفته است، همراه با رشد جمعیت و افزایش مراکز درمانی، خرید، سیاحتی و گردشگری و افزایش رفت‌وآمد، ترافیک شهر همدان به‌صورت معناداری افزایش پیدا کرده است و این باعث شده است آلودگی هوای شهری نیز دست‌خوش تغییرات فراوانی شود و سلامت جسمانی و روانی شهروندان را به‌خطر بیاندازد. یکی از مهم‌ترین عوامل ترافیکی شهر همدان، تقاطع‌ها و راس‌های هندسی ترافیکی است که کنترل عبور و مرور آنها، به‌صورت متداول با چراغ‌های راهنمایی و رانندگی به‌صورت زمان‌بندی ثابت انجام می‌شود. این چراغ‌های راهنمایی و رانندگی متناسب با تعداد مسیرهای منتهی به آن از ۱۵ ثانیه لغایت ۶۰ ثانیه متغیر است و به‌صورت خطی و یکنواخت، تغییر وضعیت می‌دهند. ایرادی که به این نوع توالی خطی وارد است، عدم در نظر گرفتن ترافیک موجود به‌صورت بلادرنگ و ناهماهنگی در میزان توقف چراغ راهنمایی و رانندگی با حجم خودروهای هر مسیر است که این باعث تشدید ترافیک، آسیب‌های روانی، خسارات مادی حاصل از تصادفات و آلودگی هوا خواهد شد.

به‌همین منظور سوالی که مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان روشی با استفاده از الگوریتم خودکار یادگیر در جهت هوشمندسازی زمان چراغ‌های راهنمایی و رانندگی در سطح شهر همدان ایجاد کرد؟

1. Roess, Prassas & McShane

پیشینه و مبانی نظری

یادگیری به‌عنوان تغییرات نسبتاً دائمی در رفتار است که این تغییرات براساس دو عامل تجربیات گذشته و سیستم آموزشی در حال و آینده ایجاد می‌شوند. اولین مدل‌های الگوریتم خودکار یادگیری در زمینه روان‌شناسی ریاضیاتی توسعه پیدا کرد. در روان‌شناسی ریاضیاتی، مدل‌های سیستم‌های یادگیری به‌منظور تشریح رفتار و یافتن الگوها در ارگانیسم‌های زنده به‌کار می‌روند. به‌عبارتی تلاش می‌شود که فرایندهای ادراکی، شناختی و فکری براساس مدل‌های ریاضی مفهوم‌سازی شوند. ورشوسکی و ورونتسوا[1] به عنوان پیشگامان این حوزه، نشان دادند که الگوریتم خودکار یادگیر تصادفی به‌وسیله به‌روزکردن احتمالات انجام هر عمل، تعداد حالات هر عمل را کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر، الگوریتم‌های خودکار یادگیر به‌عنوان مدلی برای یادگیری، در محیطی تصادفی عمل کرده و قادر هستند که براساس ورودی‌های دریافت‌شده از محیط، احتمال انجام عملیات خود را به‌روز درآورند تا بتوانند از این طریق، کارآیی خود را در تصمیم‌های آینده بهبود بخشند (رسولی، میبدی و مرشدلو، ۲۰۱۳، ص ۳). با وجود این‌که پژوهش یادشده، به مبانی اصل الگوریتم خودکار یادگیر پرداخته است، اما کاربرد آن در عمل، جهت هوشمندسازی ویژگی‌های کلاسیک مدیریت شهری ازجمله هوشمندسازی ترافیک نامشخص است. رفته‌رفته استفاده از الگوریتم خودکار یادگیر در زمینه‌های دیگری مانند: علوم مهندسی، بازاریابی، طراحی شهری و غیره مورد استفاده قرار گرفت. باتیتیس[2]، الگوریتم خودکار یادگیر سلولی را مورد توجه قرار داد. الگوریتم خودکار یادگیر سلولی، یک مدل ریاضی برای سیستم‌هایی با اجزای ساده است؛ به‌طوری‌که رفتار هر جزء براساس رفتار همسایگانش و نیز تجربیات گذشته‌اش تعیین و اصلاح می‌شود. اجزای ساده

1. Varshovsky and Verontsova
2. Batitis

تشکیل‌دهنده این مدل، از طریق کنش و واکنش با یکدیگر رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند، بنابراین از آن می‌توان در مدل‌سازی بسیاری از مسائل بهره برد. هر الگوریتم خودکار یادگیر سلولی، از یک الگوریتم خودکار سلولی تشکیل شده است که هر سلول آن به یک یا چند الگوریتم خودکار یادگیر دیگر مجهز است که وضعیت این سلول را مشخص می‌سازد. قانون محلی در محیط حاکم است و این قانون تعیین می‌کند که آیا عمل انتخاب‌شده توسط یک الگوریتم خودکار در سلول باید پاداش داده شود و یا اینکه جریمه شود. از این مدل‌ها در جایابی چراغ‌های راهنمایی، زمان روشن‌بودن هر چراغ و حتی طراحی خیابان‌ها و به‌ویژه تقاطع‌ها استفاده کردند (رضوانیان و میبدی، ۲۰۱۵، ص ۹). در این پژوهش نیز، تفاوت بین انواع الگوریتم خودکار یادگیر با یکدیگر از حیث دقت و صحت بررسی نشده است و از این منظر نیز خلا پژوهشی وجود دارد. در پژوهشی دیگر، از سیستم‌های خبره به‌منظور طراحی چراغ‌های راهنمایی تقاطع‌ها استفاده شد. این سیستم‌ها از یک سری قوانین از پیش‌تعیین‌شده به‌منظور تصمیم‌گیری عمل بعدی استفاده می‌کنند (پراشان و بانتاگار[1]، ۲۰۱۱، ص ۱۶۴۲). در نتایج این پژوهش بیشتر براساس مبانی کیفی، به سیستم‌های خبره جهت تصمیم‌گیری‌های بعدی پرداخته است، درصورتی‌که هوشمندسازی چراغ‌های راهنمایی و رانندگی مسئله‌ای کاملاً کمی بوده و با روش‌های کمی قابل حل است. ازجمله سیستم‌های دیگری که در چندسال گذشته به‌منظور کنترل ترافیک مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم کنترل فازی است. یکی از شهرهایی که از این سیستم به‌منظور کنترل ترافیک استفاده کرده است، کوالالامپور[2] است. حجم وسایل نقلیه مختلف در این شهر درسال‌های گذشته به شدت افزایش یافته است و در حدود بیست درصد، هرساله به این حجم افزوده شده است. هرچند جریان عبور و مرور در ساعت‌های

1. Prashanth & Bhatnagar
2. Kuala Lumpur

پر رفت‌وآمد، تا حدود زیادی به‌وسیله نیروی پلیس کنترل می‌شود، اما افزایش تصاعدی وسایل نقلیه، نیاز به استفاده ازسیستم‌های پیشرفته‌تری را نمایان کرد. برای حل این مشکل، یک سیستم کنترل فازی به‌منظور مدیریت ترافیک طرح‌ریزی شد. چراغ‌های راهنمایی که براساس کنترل فازی طراحی شده بودند، عملکرد بسیار بهتری نسبت به چراغ‌های راهنمایی معمولی (که دارای توالی ثابت در روشن و خاموش‌شدن چراغ‌ها هستند)، داشتند (خلید[1]، ۱۹۹۵، ص ۳۳). نتایج پژوهشی دیگر حاکی از آن است که توانایی به‌کارگیری کنترل‌های به‌هنگام، هسته تصمیم‌گیری در سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند است. استفاده از چارچوب‌های چندعاملی به شکل فزاینده‌ای در کنترل ترافیک شهری و چهارراه‌ها رو به گسترش است و توسعه سیستم‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی به‌عنوان مکانیزمی برای کنترل حمل‌ونقل به‌عنوان راهی برای مدیریت آینده ترافیک در کلان‌شهرها به اثبات رسیده است (گری، مونگه، پاچینی، ماتوس و کارینو[2]، ۲۰۲۱، ص ۱۰۸). (شاکری، دلداری، رضوانیان و فروغی، ۲۰۰۸، ص ۳۰۴)، برای تصمیم‌گیری به‌منظور تنظیم زمان‌بندی چراغ راهنمایی و رانندگی، از دو ورودی اولویت خیابان و تعداد سلول‌های ترافیکی استفاده کردند. به جهت این‌که تراکم و ترافیک در خیابان‌هایی که دارای اولویت بالایی هستند، دارای اثرات نامطلوب بیشتری است، از عامل اولویت به‌منظور تنظیم زمان چراغ راهنمایی استفاده کردند. از طرف دیگر عامل اصلی تغییر زمان در چراغ راهنمایی، تعداد وسایل نقلیه‌ای است که در چهارراه ها متوقف شده‌اند که این عامل توسط سلول‌های ترافیکی نمایش داده می‌شود. برای تعیین نحوه عملکرد بهینه چراغ‌های راهنمایی می‌توان از قوانین فازی و الگوریتم خودکار سلولی نیز استفاده کرد. در پژوهشی، برای تعیین اولویت مسیرها در تقاطع و با محاسبه تعداد وسایل نقلیه منتظر پشت چراغ قرمز با استفاده از الگوریتم یادگیر

1. Khalid
2. Gregurić, Monge, Pacini, Mateos & Garino

سلولی در هر لحظه، روشی برای کنترل پویای نور ترافیک ارائه شد. با استفاده از این روش، اولویت خیابان در ساعات مختلف در طول روز محاسبه شده و با توجه به اولویت مسیرها، به هر مسیر، زمان لازم برای عبور براساس شدت نور کم و زیاد اختصاص یافت (فوکودا، سگاوا، واتانبی[1]، ۲۰۲۱، ص ۴). شباهت این پژوهش با تحقیق حاضر را می‌توان در هوشمندسازی روشن و خاموش‌شدن چراغ‌های راهنمایی و رانندگی دانست و تفاوت آن در استفاده از الگوریتم خودکار سلولی و الگوریتم خودکار یادگیر است که اگوریتم خودکار سلولی نرخ پاسخ‌دهی کندتری نسبت به الگوریتم خودکار یادگیر دارد. هر چقدر محیط ترافیکی پیچیده‌تر شود، اهمیت طراحی چراغ‌های راهنمایی وفق‌پذیر با محیط، بیشتر می‌شود. ازطرف دیگر، در مسائل ترافیک، دسترسی اولیه به جواب و سیگنال کنترلی بهینه امکان‌پذیر نیست، بنابراین نمی‌توان از روش‌هایی که به‌طور مستقیم عامل را از عمل بهینه مطلع می‌کند، استفاده کرد. به‌همین دلیل بایستی از روش‌هایی که در آن تطبیق لحظه‌ای و احتیاج به داده اولیه، وجود ندارد، استفاده کرد. از این‌رو می‌توان از یادگیری تقویتی، استفاده کرد. در این یادگیری، تنها مسیر اطلاع‌رسانی به عامل سیگنال، پاداش به داده‌های قبلی است که با استفاده از آن به عامل گفته می‌شود که عملی که انجام داده به چه میزان مناسب و یا نامناسب بوده است (وی، ژنگ، گایا و لی[2]، ۲۰۲۱، ص ۳۱). (حسن‌زاده و احدی، ۱۳۹۵، ص ۳۵) در پژوهش خود دریافتند که سیستم‌های آشکارساز خودروکه جز مهمی از سامانه حمل‌ونقل هوشمند است، بر مبنای الگوریتم‌های شناسایی مختلفی به شناسایی می‌پردازند. این الگوریتم‌ها بیشتر خطی بوده و از طریق روش تاپسیس فازی به اولویت‌بندی الگوریتم‌های شناسایی پرداخته شده است. درنهایت نتایج این مقالات نشان داده است که شناساگر حلقه القایی بهترین گزینه برای شناسایی خودروهای پشت چراغ

1. Fukuda, Segawa & Watanabe
2. Wei, Zheng, Gayah & Li

قرمز است و عملکرد بهتری از خود نشان داده است. (حاجی‌حسینلو و قائمی، ۱۳۹۲، ص ۱۲) که در رابطه با ارزیابی اثر زمان‌بندی هوشمند تقاطع‌ها بر جریان ترافیک و آلودگی هوای شبکه‌های ترافیکی درون‌شهری، پژوهشی انجام دادند، دریافتند که با هوشمندکردن زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی و رانندگی، میانگین زمان سفر برای هر خودرو، میزان تأخیر در شبکه و مجموع مصرف سوخت در شبکه به‌ترتیب ۱۵، ۱۴ و ۴ درصد کاهش می‌یابد. از نتایج دیگر این پژوهش می‌توان به کاهش ۶ و ۸ درصدی غلظت آلاینده‌های خطرناک اشاره کرد.

درنهایت با بررسی پژوهش‌های قبلی مشخص شد که خلا پژوهشی مهمی درخصوص به‌کارگیری الگوریتم به هنگامی‌که بتواند در هر شرایط خاصی براساس تعداد مشخصی از خودروها پشت تقاطع‌ها و چهارراه‌ها، پیش‌بینی دقیق و به هنگامی انجام دهد وجود دارد، بنابراین در ادامه پس از ارائه مبانی نظری، به ارائه روش پیشنهادی پرداخته خواهد شد. هم‌چنین از نظر دانش فعلی این حوزه، هیچ ارزیابی جامعی از توانایی انواع الگوریتم خودکار در کنترل چراغ‌های راهنمایی در شرایط مختلف ترافیکی وجود ندارد که پرداختن به آن سهم اصلی این مقاله است.

سیستم کنترل هوشمند ترافیک[1]: سیستمی است که فناوری‌های ترافیک را با هوش مصنوعی ترکیب می‌کند تا مشکلات ترافیکی مانند ازدحام ترافیک در یک تقاطع را کاهش دهد. با دریافت اطلاعات از محیط به‌صورت مستمر، سیستم می‌تواند در مورد توالی چراغ سبز و مدت زمان آن فکر کند و تصمیم بگیرد. چراغ راهنمایی مبتنی بر ITLC می‌تواند در مقایسه با کنترل سیگنال ترافیکی سنتی از اتلاف وقت کاربران در تقاطع‌ها جلوگیری کند. کاهش زمان حمل‌ونقل باعث صرفه‌جویی زیادی در جامعه خواهد شد.

1. Intelligent traffic control system (ITLC)

ادعا می‌شود که با کاهش زمان انتظار در تقاطع‌ها، می‌توان سالانه یک میلیارد یورو صرفه‌جویی به‌عمل آورد. براساس تحقیقی که در رومانی و ایالات متحده انجام شد، چراغ راهنمایی هوشمند می‌تواند باعث کاهش ۲۸درصدی اتلاف وقت و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به مقدار ۶/۵درصد شود (آمبکار، دوی و نیلاپو[1]، ۲۰۱۷، ص ۱۴).

در برخی مطالعات اخیر، سعی شده مشکل ITLC را با روش‌های مختلف، به‌ویژه در زمینه هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی (سایتو و فان[2]، ۲۰۰۰، ص ۲۹۷) و منطق فازی (ترابیا، کاسکو و آنده[3]، ۱۹۹۹، ص ۳۵۹)، برای توسعه سیستم کنترل ترافیک حل کنند، اما این روش‌ها فقط یک طرف را در نظر می‌گیرند و مشکلات دیگر را متوجه نمی‌شوند. یونس[4] و بوکرچه[5] یک الگوریتم کنترل هوشمند چراغ راهنمایی معرفی کردند. ITLC برای برنامه‌ریزی مؤثر فازهای هر چراغ راهنما طراحی شده است. این الگوریتم از مشخصات ترافیکی در زمان واقعی جریان‌های متقابل ترافیک در محل‌های اتصال یک جاده استفاده می‌کند. علاوه بر این، آنها از الگوریتم ITLC برای طراحی الگوریتم برنامه‌ریزی ترافیک برای سناریوی اصلی خیابان‌ها استفاده کردند. بنابراین الگوریتم کنترل نور شریانی ارائه شد (یونس، بوکرچه و مامری[6]، ۲۰۱۶، ص ۴). مایو و خیو[7] اشاره کردند که چراغ راهنمایی با سیگنال چرخه ثابت بسیار کم بازده است و انرژی زیادی را در مناطق شهری مصرف می‌کند. از طرف دیگر، هیچ تضمین کیفیتی در خدمات ارائه نمی‌دهد و زمان سفر را بسیار زیاد می‌کند. در این مطالعه، آنها به‌جای متوسط زمان صرف‌شده، از

1. Ambekar
2. Saito & Fan
3. Trabia, Kaseko & Ande
4. Younes
5. Boukerche
6. Younes, Boukerche & Mammeri
7. Miao & Xu

بدترین حالت ممکن از بعد زمان ترافیکی استفاده کردند. آنها با استفاده از نتایج نظری خود، کنترل‌کننده‌ای ساده اما کارآمد ارائه داده و از شبیه‌سازی‌هایی برای اعتبارسنجی کارآیی استفاده کردند (میائو و خیو[1]، ۲۰۱۷، ص ۲۹۳). در مطالعه دیگری، کنترل‌کننده هوشمند ترافیک با استفاده از فناوری اف‌پی‌جی‌ای اسپارتان[2] با پنج مرحله کنترل ترافیک بازخوردی طراحی شد. این روش با جریان ترافیک برای زمان‌های اوج مصرف و ترافیک عادی روز و الگوهای ترافیکی در تعطیلات به‌خوبی سازگار بود (پانگ[3]، ۲۰۱۶، ص ۴۵۱). هیو، وانگ، یان و دو[4] (۲۰۱۶)، الگوریتم خودکار سلولی داخلی و خارجی را با بهینه‌سازی ازدحام ذرات[5] برای دست‌یابی به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی چراغ راهنمایی شهری ارائه دادند. رویکرد ازدحام ذرات شامل یک مدل سلولی داخلی[6]، یک مدل سلولی خارجی[7] و یک تابع هدف بود (هیو، وانگ، یان و دو، ۲۰۱۶، ص ۲۲۴).

زونگ و لیائوخاطرنشان کردند که با رشد سریع شهرنشینی در چین، مشکل ترافیک جدی‌تر می‌شود. آنها هم‌چنین ادعا کردند که توسعه سیستم کنترل سیگنال هوشمند ترافیک یک موضوع تحقیقاتی ارزشمند برای کاهش ازدحام ترافیک است (ژونگ و لیائو، ۲۰۱۷، ص ۱۴۹). (امبکار، جوالکار، پاتیل و پاتیل[8]، ۲۰۱۷، ص ۴) ادعا کردند که کنترل‌کننده‌های چراغ راهنمایی موجود به‌دلیل اجرای برنامه‌های موازی و عدم سازگاری به‌هنگام با محیط، محدودیت‌هایی دارند، بنابراین آنها چراغ راهنمایی هوشمند را ارائه دادند (امبکار، جوالکار، پاتیل و پاتیل، ۲۰۱۷، ص ۱۰). رادماچر[9] در پایان‌نامه خود،

1. Miao & Xu
2. FPGA 3A Spartan IC
3. Pang
4. Hu, Wang, Yan & Du
5. IOCA-PSO
6. Internal cell model (ICM)
7. External cell model (ECM)
8. Ambekar, Jawalkar, Patil & Patil
9. Rademacher

روش‌های کنترل چراغ راهنمایی را براساس تأثیر آنها بر شرایط ترافیکی شهر دوبلین[1] بررسی کرد. در این تحقیق، نتایج ۴۱درصد و ۱۷درصد عملکرد بهتر سیستم کنترل انطباقی را در مقایسه با دو روش دیگر نشان داد (رادماچر، ۲۰۱۷، ص ۱۱۲). در پژوهش یونس، بوکرچه و مامری (۲۰۱۶) الگوریتم خودسازمان‌ده آگاه از محتوا[2] طراحی شده است. این الگوریتم از مشخصات جریان ترافیک و حضور وسایل نقلیه اضطراری در جریان در هر محل اتصال جاده با چراغ استفاده می‌کند.

تصادفی‌بودن در طبیعت ترافیک است که به بسیاری از عوامل شناخته‌شده و ناشناخته بستگی دارد؛ بنابراین یک رویکرد ITLC نیاز به رسیدگی به مشکلات ناشی از این مسئله دارد. به‌دلیل کمبود دانش در مورد فرآیند تولید ترافیک، یادگیری تقویت‌کننده (الگوریتم خودکار یادگیر به‌عنوان نماینده این نوع روش‌های یادگیری ماشین) گزینه مناسبی برای کنترل عبور و مرور در جریان ترافیکی است (علی، دوی و نیلاپو، ۲۰۲۱، ص ۶۱۳). در پژوهش‌های پیشین مرتبط، فرض بر این است که چراغ‌های راهنمایی در هر طرف چهارراه توسط یک عامل کنترل می‌شوند. در حالی‌که ترافیک پشت هر طرف چهارراه در حال انجام است، تولید ترافیک در هر جهت ممکن است متفاوت باشد. عملکرد فقط با معیار حجم ترافیک اندازه‌گیری می‌شود. فضای تقاطع یک فضای دوبعدی است و باید از برخورد بین حجم ترافیک پشت محل اتصال توسط چراغ‌ها خودداری کند. همان‌طورکه گفته شد روش‌های یادگیری تقویتی مانند الگوریتم خودکار یادگیر می‌توانند بدون نیاز به شناخت محیط و فقط با دریافت سیگنالی از آن، که نوآوری در طراحی هوشمند چراغ راهنمایی است، تصمیم بگیرند (شارما، باناسال، کاشیاپ، گویال و شیخ[3]، ۲۰۲۱، ص ۱۳).

1. Dublin City
2. CA-TLS
3. Sharma, Bansal, Kashyap, Goyal & Sheikh

یادگیری تقویتی: یادگیری ماشین به‌عنوان یکی از شاخه‌های گسترده و پرکاربرد هوش مصنوعی، روش‌ها و الگوریتم‌هایی را که کامپیوترها و سیستم‌ها می‌توانند براساس آنها یاد بگیرند، تنظیم و کاوش می‌کند. هدف از یادگیری ماشین این است که رایانه‌ها به معنای عام آنها می‌توانند با استفاده از داده‌های بیشتر به تدریج عملکرد بهتری پیدا کنند (کایران، سبح، تلپارت، مانین، آلساب، یوگامانی و پرز[1]، ۲۰۲۱، ص ۲۱). یادگیری تقویتی یا RL[2] یک رویکرد تعاملی است و با یادگیری با نظارت متفاوت است (گری، مونگه، پاچینی، ماتوس و کارینو، ۲۰۲۱، ص ۱۱۰). در این نوع یادگیری، از سیگنال‌ها و معیارهای ضمنی برای یادگیری غیرمستقیم استفاده می‌شود تا درستی یا نادرستی فرایند یادگیری را تشخیص دهد. به‌عبارت دیگر، دانش ذخیره‌شده فعلی با پاداش یا مجازات، تقویت یا ضعیف می‌شود (ساتون و بارتو[3]، ۲۰۱۱، ص ۵).

الگوریتم خودکار یادگیر[4]: الگوریتم خودکار یادگیری را می‌توان به‌عنوان یک شی انتزاعی با تعداد محدودی اعمال در نظر گرفت. الگوریتم خودکار یادگیر با انتخاب عملی از مجموعه اقدامات و اعمال آن در محیط کارساز است. عملکرد توسط یک محیط تصادفی ارزیابی می‌شود و الگوریتم خودکار برای انتخاب مرحله بعدی از پاسخ محیطی استفاده می‌کنند. در طی این فرآیند، الگوریتم خودکار یاد می‌گیرند که عملکرد بهینه را انتخاب کنند. استفاده از پاسخ محیطی به کنش انتخابی که برای انتخاب عملکرد الگوریتم خودکار بعدی استفاده می‌شود توسط الگوریتم خودکار یادگیر تعیین می‌شود (گری، مونگه، پاچینی، ماتوس و کارینو، ۲۰۲۱، ص ۱۱۱). الگوریتم خودکار یادگیر به دو گروه الگوریتم خودکار با ساختار ثابت و الگوریتم خودکار با ساختار متغیر تقسیم می‌شوند. در

1. Kiran,Sobh, Talpaert, Mannion, Al Sallab, Yogamani, & Pérez
2. Reinforcement Learning
3. Sutton & Barto
4. Learn automata

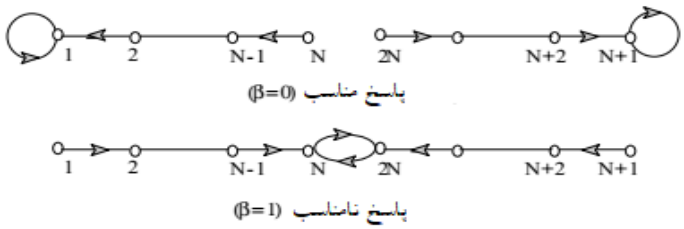
الگوریتم خودکار تصادفی با ساختار ایستا، احتمال اعمال ثابت است، مانند انواع تست‌لاین[1]، کرینسلکی[2]، تست‌لاین‌جی[3] و کرایلوف[4]. در حالی‌که در الگوریتم خودکار تصادفی با ساختار متغیر، احتمال اعمال در هر تکرار تغییر می‌کند (اوربات و اسکرادر[5]، ۲۰۲۰، ص ۱۰۲). در ادامه مواردی را که در این مقاله استفاده شده است، شرح می‌دهیم.

الگوریتم خودکار دوحالته: این الگوریتم خودکار دارای دو حالت φ_1 و φ_2 و دو اقدام α_1 و α_2است. الگوریتم خودکار ورودی‌هایی از یک مجموعه $\{0,1\}$ را قبول می‌کند. الگوریتم خودکار، حالت خود را در شرایط دریافت ورودی یک یا پاسخ نامناسب تغییر می‌دهد و با دریافت ورودی صفر یا پاسخ مناسب ثابت باقی می‌ماند. الگوریتم خودکاری که از این استراتژی استفاده می‌کند به‌عنوان $L_{2,2}$ شناخته می‌شود؛ که زیرنویس اول به تعداد حالات و زیرنویس دوم تعداد اقدام‌ها است (ژانگ و وانگ[6]، ۲۰۲۱، ص ۲۹۴).

الگوریتم خودکار دواقدامی با حافظه: این الگوریتم خودکار، یک حالت و دو اقدام دارد؛ تا رفتار سیستم در قانون تصمیم برای انتخاب توالی اقدام‌ها را در هم ترکیب کند. درحالی‌که الگوریتم خودکار با دریافت پاسخ شکست از محیط، از یکی از اقدام‌ها به دیگری سوئیچ می‌کند، حساب تعداد شکست‌ها و موفقیت‌های دریافتی از هر اقدام را نگه می‌دارد. فقط زمانی‌که تعداد شکست‌ها از تعداد موفقیت‌ها یا از مقدار بیشینه بیشتر شود، الگوریتم خودکار از یک اقدام به دیگری سوئیچ می‌کند. پروسه توصیف‌شده، یک روش

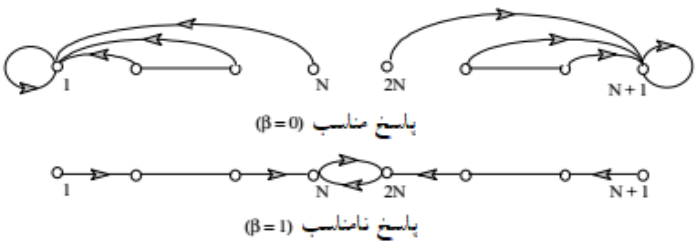
1. Testline
2. Krinsky
3. TestlineG
4. Krylov
5. Urbat & Schröder
6. Zhang & Wang

مناسب برای حفظ اثر عملکرد اقدام‌های بعدی است. به‌همین خاطر عمق حافظه مرتبط با هر اقدام است و گفته می‌شود که هر الگوریتم خودکار حافظه‌ای برابر دارد. برای هر پاسخ مناسب حالت الگوریتم خودکار عمیق‌تر به حافظه اقدام مرتبط می‌رود و برای یک پاسخ نامناسب از آن استخراج می‌شود. این الگوریتم خودکار می‌تواند به یک الگوریتم خودکار چنداقدامی توسعه پیدا کند (کای، ژانگ و کای[1]، ۲۰۱۹، ص ۱۲).



شکل شماره ۱- گراف انتقال حالت $L_{2N,2}$ (کای، ژانگ و کای، ۲۰۱۹، ص ۱۳)

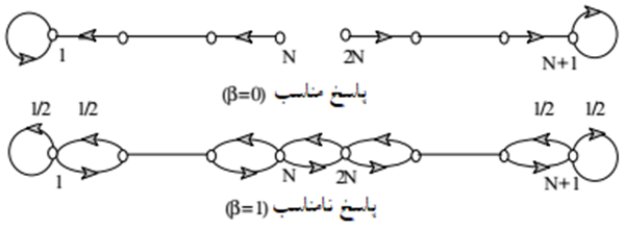
الگوریتم خودکار کرینسلکی: این الگوریتم خودکار وقتی پاسخ محیط نامناسب است، دقیقاً مانند قبل رفتار می‌کند؛ اما برای پاسخ مناسب هر حالت به حالت دیگر منتقل می‌شود. بدین ترتیب این موضوع را می‌رساند که پاسخ نامناسب متوالی برای تغییر از یک اقدام به دیگری نیاز است. گراف انتقال حالت الگوریتم خودکار کرینسکی در شکل ۲ نشان داده شده است (خجسته و میبدی، ۲۰۰۵، ص ۳۱۰).



شکل شماره ۲- گراف انتقال حالت برای الگوریتم خودکار کرینسکی

1. Cai, Zhang & Cai

الگوریتم خودکار کریلوف: این الگوریتم خودکار در حالتی که خروجی محیط مناسب است، انتقال حالتی مشابه با $L_{2N,2}$ دارد. با این‌وجود وقتی پاسخ محیط نامناسب است، یک حالت φ_i برای $i \neq 1, N, N+1, 2N$ با احتمال ۰/۵ به یک حالت φ_{i+1} و با احتمال ۰/۵ به φ_{i-1} می‌رود. وقتی $i=1$ یا $i=N+1$، φ_i با احتمال یکسان در حالت مشابهی می‌ماند. وقتی $i=N$ با احتمال ثابت ۰/۵، حالت الگوریتم خودکار از φ_{N-1} به φ_{2N} می‌رود. گراف انتقال حالت الگوریتم خودکار کریلوف در شکل ۳ نشان داده شده است (خجسته و میبدی، ۲۰۰۵، ص ۳۱۱).



شکل شماره ۳-گراف انتقال حالت برای الگوریتم خودکار کریلوف

الگوریتم خودکار تصادفی با ساختار متغیر: در الگوریتم خودکار یادگیر با ساختار متغیر، تغییرات احتمال اعمال براساس الگوریتم یادگیری انجام می‌شود. در این نوع الگوریتم خودکار، حالت داخلی الگوریتم خودکار با احتمال اعمال نشان داده می‌شود. الگوریتم یادگیری یک رابطه تکراری است و برای اصلاح بردار احتمال حالت استفاده می‌شود. بدیهی است که عامل تعیین‌کننده عملکرد الگوریتم خودکار یادگیری الگوریتم یادگیری برای به‌روزرسانی احتمال اقدام‌ها است. الگوریتم‌های یادگیری مختلفی در ادبیات وجود دارد (معصومی و میبدی، ۲۰۱۲، ص ۴۳۵). شکل کلی الگوریتم یادگیری به شرح زیر است.

اگر عمل در مرحله انتخاب شود، در مرحله بعدی ما خواهیم داشت:

پاسخ: پاسخ مناسب از محیط

فرمول (۱)

$$p_i(n+1) = p_i(n) + a[1 - p_i(n)]$$
$$p_j(n+1) = (1-a)p_j(n) \qquad \forall j, \quad j \neq i$$

ب: پاسخ نامناسب از محیط

فرمول (۲)

$$p_i(n+1) = (1-b)p_i(n)$$
$$p_j(n+1) = \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(n) \qquad \forall j, \quad j \neq i$$

که r تعداد اقدام‌های الگوریتم خودکار، a پارامتر پاداش و b پارامتر جریمه هستند. با توجه به مقادیر a و b در روابط فوق، سه حالت را می‌توان در نظر گرفت. اگر مقادیر a و b برابر باشند، الگوریتم خودکاری یادگیر L_{RP} نامیده می‌شود. زمانی که b مساوی با صفر باشد الگوریتم خودکاری یادگیر L_{RI} نامیده می‌شود. اگر $b << a$ باشد، الگوریتم خودکاری یادگیر $L_{R\varepsilon P}$ نامیده می‌شود (معصومی و میبدی، ۲۰۱۲، ص ۱۴۶).

روش

روش تحقیق حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، شبیه‌سازی- مشاهده‌ای است. تکنیک و روش مورد استفاده در این پژوهش، استفاده ترکیبی از روش الگوریتم خودکار یادگیر است. داده‌های مورد استفاده برای بخش آموزش الگوریتم در این پژوهش در ساعاتی با ترافیک کم، زیاد و متوسط در تقاطع‌های منطقه یک از شهر همدان جمع‌آوری شده که طبق داده‌های به‌دست‌آمده مشخص شد در هر سیکل چراغ سبز در هر ساعتی از شبانه‌روز چه تعداد وسیله نقلیه تردد کردند و نرخ تخلیه خودروها در هر سیگنال چراغ سبز

چقدر است. این داده‌ها به مدت چند روز متوالی جمع‌آوری و متناسب با تعداد تردد تنظیم شده است. اجرای روش پیشنهادی در سیکل ۴ تایی ۶۰ ثانیه (معادل ۲۶۰ ثانیه) در تاریخ ۹ خرداد ۱۴۰۰ زمان: ۲۰:۱۳:۱۵ الی ۲۰:۱۷:۱۵ انجام شد. ابزار جمع‌آوری داده‌ها، مجموعه دادگان مقاله (یاسینیان و اسماعیل‌پور، ۲۰۲۱، ص ۱۱) بوده است. محیط پیاده‌سازی روش پیشنهادی نیز، نرم‌افزار متلب[1] نسخه ۲۰۲۰ بوده است.

روش‌های پیشنهادی: یک تقاطع را در نظرگرفته شده و به ماشین‌های هر طرف اجازه داده خواهد شد در یک زمان مشخص عبور کنند، بنابراین می‌توان منابع را بهینه کرده و مدت زمان صرف شده را به حداقل رساند. در این حالت، هدف این است که اولویت بیشتری به طرف‌های شلوغ‌تری داده شود، اما نباید طرف‌های خلوت‌تر را بی‌توجه رها کرد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که کنترل‌کننده چراغ راهنمایی هیچ اطلاعاتی در مورد نحوه توزیع ترافیک در هر طرف محل اتصال ندارد و باید به مرور زمان توزیع ترافیک در هر طرف محل اتصال را بیاموزد. برای دست‌یابی به این هدف، باید معیاری داشت که هزینه تعیین توالی بهینه سیگنال ترافیک نامیده می‌شود. با استفاده از تعداد متوسط خودروهایی که در یک فاصله زمانی مشخص منتظر عبور نیستند، به دست می‌آید. روش پیشنهادی و الگوریتم‌های دیگر باید با این معیار ارزیابی شوند و به عنوان ورودی از محیط (محل اتصال) برای تصمیم‌گیری و ایجاد محاسبات لازم در اختیار الگوریتم قرار گیرد.

روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم خودکار دو حالته: در این نوع الگوریتم خودکار دو حالت برای چراغ راهنما در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول، چراغ راهنمایی در وضعیت فعلی باقی می‌ماند و در حالت دوم چراغ سبز تغییر می‌کند و در سمت بعدی محل اتصال چراغ سبز مشاهده می‌شود. در شکل ۴ سناریوی این نوع چراغ راهنمایی، ارائه شده است.

1. Matlab

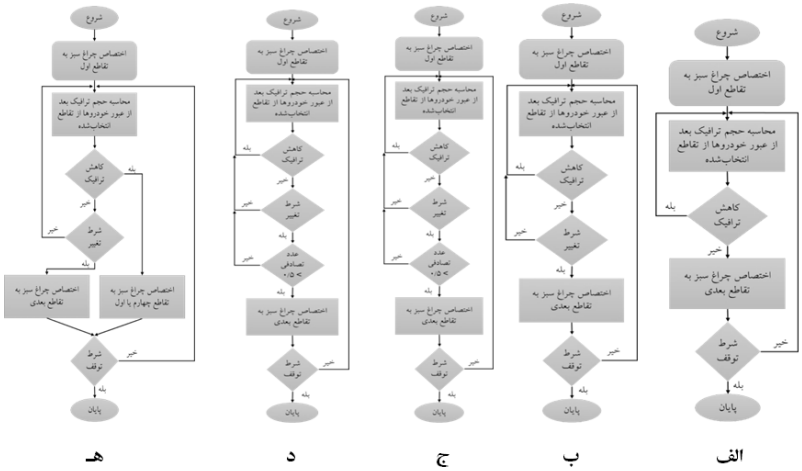
روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم خودکار دو اقدامی با حافظه: در این نوع از الگوریتم خودکار یعنی $L_{2N,2}$ در حالتی که پاسخ محیط مناسب است، مانند روش قبل عمل می‌کند؛ ولی وقتی نتوانست ترافیک را کاهش دهد، اگر تعداد شکست‌ها از تعداد موفقیت‌ها یا یک مقدار پیش‌فرض N بیشتر شد، چراغ برای تقاطع بعدی سبز می‌شود. در شکل ۴ شاهد این روش در طراحی چراغ راهنمایی ارائه شده است. روند الگوریتم در این روش کمی پیچیده‌تر از روش قبلی است؛ زیرا علاوه بر شکست و موفقیت، این روش از حافظه نیز بهره می‌گیرد که مزیت آن نسبت به الگوریتم قبلی به حساب می‌آید.

روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم خودکار کرینسلکی: برای طراحی روشی مبتنی بر این نوع الگوریتم خودکار، در مورد پاسخ نامناسب دقیقاً به همان روش قبلی عمل می‌شود و در غیر این صورت اگر چراغ اول یا دوم سبز باشد، آن به چراغ اول تبدیل می‌شود و اگر چراغ سوم یا چهارم سبز باشد، چراغ چهارم روشن می‌شود، فرایند این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است.

روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم خودکار کریلوف: این روش مانند الگوریتم خودکار دو عمل با حافظه را درصورت پاسخ مناسب انجام می‌دهد، اما در حالت پاسخ نامناسب طرف با احتمال ۰/۵ سبز باقی می‌ماند و با همان احتمال، طرف بعدی چراغ سبز را روش می‌کند. در شکل ۴ سناریو این الگوریتم ارائه شده است.

روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم خودکار یادگیر تصادفی با ساختار متغیر: در این روش، یک الگوریتم خودکار با چهار عملکرد در نظر گرفته شده است. هر عمل نشان‌دهنده روشن شدن نور سبز یک طرف در محل اتصال است. در ابتدا، بردار احتمال برابر است با یک آرایه حاوی چهار مقدار یکسان که نشان می‌دهد احتمال انتخاب هر یک از اعمال یا روشن شدن چراغ سبز هر طرف در محل اتصال برابر است. در هر چرخه، یکی

از طرفین، سیگنال سبز را دریافت می‌کند و تعیین توالی با استفاده از بردار احتمال انجام می‌شود. به روشی که طرفین با احتمال بیشتری امید بیشتری به دریافت سیگنال سبز دارند. بعد از هر چرخه، مقدار کل وسایل نقلیه محاسبه می‌شود و اگر این تعداد کمتر از قبلی باشد، عمل پاداش داده می‌شود و در غیر این‌صورت عمل جریمه می‌شود و بردار احتمال به روز می‌شود (شکل ۵).



شکل شماره ٤- الف) فلوچارت روش پیشنهادی با استفاده از آتاماتای دوحالته؛ ب) فلوچارت روش پیشنهادی با استفاده از آتاماتای دو اقدامی با حافظه؛ ج) فلوچارت روش پیشنهادی با استفاده از آتاماتای کرینسلی؛ د) فلوچارت روش پیشنهادی با استفاده از آتاماتای کریلوف؛ هـ) فلوچارت روش پیشنهادی با استفاده از آتاماتای یادگیر با ساختار متغیر

یافته‌ها

در ادامه، حداکثر، حداقل و متوسط ترافیک، به‌دست آورده شده است که بیان‌گر تعداد متوقف شده در تقاطع منتظر عبور از چرخه‌ها است. برای اثبات قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها، این آزمایش‌ها ۳۰ بار تکرار شد و نتایج نهایی از میانگین این مقادیر و انحراف معیار

به‌دست‌آمده که نشان‌گر ثبات روش‌ها در تولید سیگنال است، بنابراین آزمون مورد استفاده در این مقاله مقایسه میانگین حجم ترافیک پشت چراغ راهنمایی است، هدف از این‌کار مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در طی تکرارهای متوالی و اعتبارسنجی در طی چندین سیکل است؛ بنابراین نیاز است از میانگین استفاده شود و برای این‌که نشان دهیم روش دارای پایایی در نتایج است، انحراف معیار هم مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه، حداقل بودن این معیارها مطلوب است. در روند این آزمایش‌ها، روش پیشنهادی با چهار روش کنترل چراغ راهنمایی از جمله تصادفی[1]، طولانی‌ترین صف[2]، چرخه ثابت[3] و یادگیری Q مشترک[4] (امبکار، جوالکار، پاتیل و پاتیل، ۲۰۱۷، ص ۱۱) و (روسیادی، ویرایودا و الفرابی[5]، ۲۰۱۶، ص ۵) مقایسه می‌شود. همان‌طورکه در بخش قبلی توضیح داده شده است، الگوریتم خودکار یادگیر براساس پاداش و مجازات کار می‌کند، بنابراین به‌ترتیب دو پارامتر a و b وجود دارد. این پارامترها باید به درستی تنظیم شوند تا به عملکرد مطلوب برسند و از هم‌گرایی سریع جلوگیری کنند. در این آزمایش، b برابر با صفر است؛ بنابراین الگوریتم خودکار L_{RI} است و a برابر با ۰/۰۵ است. پارامترها با استفاده از آزمون و خطا پیدا شدند.

جدول شماره ۱- مقایسه الگوریتم خودکارهای مختلف بر روی داده‌های چهارراه

معیار	الگوریتم	وضع ترافیک		
		پیک خلوت	متوسط	شلوغ
میانگین ترافیک	دوحالته	۶۱/۲۵	۵۹	۱۱۴/۴۰
	دو اقدامی با حافظه	۵۷/۵۲	۸۹/۵۸	۱۲۱/۳۸
	کرینسکی	۶۴/۸۱	۹۳/۷۰	۱۳۲/۹۸

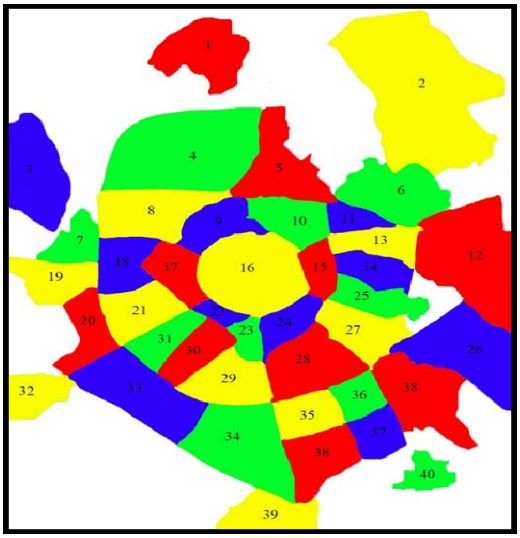
1. Random
2. Longest queue
3. Fixed Cycle
4. Collaborative Q-Learning
5. Rosyadi,Wirayuda & Al-Faraby

معیار	الگوریتم	وضع ترافیک		
		پیک خلوت	متوسط	شلوغ
	کریلوف	۷۱/۶۵	۱۰۰/۹۰	۱۳۲/۵۱
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۵۵/۱۲	۸۸/۹۳	۱۲۴/۶۵
حداکثر ترافیک	دوحالته	۱۵۸	۱۸۱	۲۰۱
	دو اقدامی با حافظه	۱۴۱	۱۸۴	۲۳۱
	کرینسکی	۱۸۹	۲۲۹	۲۶۳
	کریلوف	۲۱۸	۲۴۳	۲۷۱
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۲۴۱	۲۷۲	۳۰۱
حداقل ترافیک	دوحالته	۵۰	۶۳	۸۰
	دو اقدامی با حافظه	۴۸	۶۲	۸۰
	کرینسکی	۲۲	۳۱	۴۳
	کریلوف	۶۱	۷۸	۹۰
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۱۸	۲۶	۳۰
انحراف معیار ترافیک	دوحالته	۱۶/۳۸	۲۰/۷۲	۲۶/۳۸
	دو اقدامی با حافظه	۱۲/۷۱	۱۵/۲۰	۲۰/۳۲
	کرینسکی	۲۸/۳۵	۲۷/۴۵	۳۷/۵۱
	کریلوف	۳۰/۱۲	۳۷/۷۱	۴۲/۲۷
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۲۴/۰۲	۳۶/۶۴	۶۵/۸۷

جدول شماره ۲- مقایسه روش پیشنهادی الگوریتم خودکار یادگیر با سایر روش‌های مختلف بر روی داده‌های چهارراه

معیار	زمان / الگوریتم	وضع ترافیک (تعداد خودرو پشت مسیر) ۰۰:۰۱ – ۰۸:۰۰	۰۸:۰۱ – ۱۵:۵۹	۱۶:۰۰ – ۰۰:۰۰
میانگین ترافیک	تصادفی	۱۰۲/۸۹	۱۴۵/۲۵	۱۹۲/۷۱
	بلندترین صف	۵۷/۵۲	۸۸/۵۲	۱۲۱/۳۸
	سیکل ثابت	۶۲/۹۸	۹۲/۹۱	۱۳۲/۹۸
	Q-Learning مشارکتی	۶۱/۹۸	۹۲/۹۸	۱۲۹/۲۵
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۵۵/۱۲	۸۸/۹۳	۱۲۴/۶۵
حداکثر ترافیک	تصادفی	۲۹۲	۳۲۵	۳۴۸
	بلندترین صف	۲۴۱	۲۷۴	۳۰۵
	سیکل ثابت	۲۵۸	۲۸۳	۳۲۱
	Q-Learning مشارکتی	۲۴۰	۲۷۹	۳۰۹
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۲۴۱	۲۷۲	۳۰۱
حداقل ترافیک	تصادفی	۳۷	۵۸	۶۹
	بلندترین صف	۱۹	۲۴	۳۹
	سیکل ثابت	۱۶	۲۷	۳۴
	Q-Learning مشارکتی	۲۱	۳۰	۳۹
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۱۸	۲۶	۳۰
انحراف معیار ترافیک	تصادفی	۵۲/۶۲	۹۸/۸۹	۱۲۸/۶۴
	بلندترین صف	۲۹/۴۳	۵۸/۲۱	۸۲/۸۵
	سیکل ثابت	۲۸/۶۲	۵۱/۶۸	۸۸/۱۵
	Q-Learning مشارکتی	۳۹/۳۹	۵۸/۱۲	۸۷/۲۰
	روش پیشنهادی (تصادفی با ساختار متغیر)	۲۴/۰۲	۳۶/۶۴	۶۵/۸۷

با توجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها در کاهش تعداد خودروهای پشت چراغ قرمز با تصمیم‌گیری مناسب در مورد توالی چراغ راهنمایی بسیار مؤثرتر عمل می‌کند. در ادامه، با به‌کارگیری عملیاتی مجموعه دادگان جمع‌آوری‌شده، توالی بعدی چراغ‌های راهنمایی منطقه یک همدان، با استفاده از روش پیشنهادی، پیش‌بینی شده است و نتایج در جدول ۳، نشان داده شده است.



شکل شماره ۵- نقشه محدوده ترافیکی شهر همدان براساس میانگین میزان ترافیک ثبت شده براساس چراغ‌های راهنمایی و رانندگی (یاسینیان و اسماعیل‌پور، ۲۰۲۱، ص ۹)

براساس میانگین مجموعه تعداد خودروهایی که در طول چراغ قرمز، در پشت مسیرها ایستاده‌اند، در سه وضعیت زمانی یک شبانه‌روز، محاسبه شده است و براساس انحراف معیار به‌دست‌آمده، به چهار دسته ترافیکی سنگین، زیاد، متوسط و روان تقسیم‌بندی می‌شود و در شکل ۵، توسط پژوهش (یاسینیان و اسماعیل‌پور، ۲۰۲۱، ص ۹) رنگ‌بندی شده‌اند.

جدول شماره ۳- یافته‌های حاصل و نتایج پیشنهادی از اجرای روش پیشنهادی در مجموعه دادگان ترافیکی شهر همدان به‌صورت دوره زمانی ۲۴۰ ثانیه با تفکیک منطقه۱ (نمونه: ۹ خرداد ۱۴۰۰، زمان: ۲۰:۱۳:۱۵ الی ۲۰:۱۷:۱۵)

منطقه	چهارراه	محدوده ترافیکی	مسیرها	نام‌گذاری مسیر	توالی موجود	توالی پیشنهادی
۱	میدان شریعتی	۳۱	خ مهدیه	۱	۲،۱،۲،۱	۲،۱،۱،۱
			خ میرزاده عشقی	۲		
	میرزاده عشقی پایین	۳۰	خ شکریه	۱	۱،۲،۳،۱	۱،۳،۲،۲
			خ میرزاده عشقی ۱	۲		
			خ میرزاده عشقی ۲	۳		
	پاستور	۲۹	خ میرزاده عشقی ۲	۱	۱،۱،۲،۳	۱،۱،۲،۳
			خ ورزش	۲		
			خ میرزاده عشقی ۳	۳		
	پیچ زندان	۲۹	خ میرزاده عشقی ۴	۱	۲،۲،۲،۱	۱،۱،۱،۲
			خ هنرستان	۲		
	میدان جهاد	۲۸	میرزاده عشقی ۴	۱	۴،۳،۲،۱	۳،۱،۲،۴
			خ جهان‌نما	۲		
			ضلع خ طالقانی	۳		
			ضلع خ بوعلی	۴		
	عمار	۳۴	عمار۱	۱	۲،۱،۱،۲	۱،۲،۱،۲
			عمار۲	۲		

بحث و نتیجه‌گیری

طبق نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳، روش پیشنهادی برای هر چراغ راهنمایی، سکیل بعدی را پیش‌بینی کرده است که در این حالت، چهارراه، با کمترین ترافیک موجود مواجه خواهد شد، این سیکل بلادرنگ بوده و ممکن است در دوره بعدی، توالی آن تغییر پیدا کند و به سمت بهینه‌سازی الگوریتم خودکار عمل کند، سامانه اجراشده، به‌طوری عمل می‌کند که با مرور زمان و با یادگیری بیشتر، آموزش دیده و کامل‌تر و با دقت بیشتری عمل می‌کند. روند تصاعدی بهبودی در این الگوریتم بلادرنگ، مرتبط با بازخوردی است که مجموعه اطلاعات سایر چراغ‌های راهنمایی و رانندگی هم‌جوار یا متصل به شبکه کلی الگوریتم خودکار یادگیر به‌دست خواهد آمد. بنابراین استفاده هم‌زمان این سامانه تحت عنوان شبکه اینترنتی یک‌پارچه می‌تواند فرایند پیاده‌سازی سیستم‌های بازخوردی با کاهش ضریب خطای سامانه را به‌طور محسوسی ایجاد کند و از انحراف و ترافیک سنگین جلوگیری کند.

طراحی، جانمایی و کنترل چراغ‌های راهنمایی با توجه به پیچیده‌شدن روزافزون شهرها و جوامع و هم‌چنین ماهیت متغیرآنها و اهمیت عامل انسانی در آن همواره از دغدغه‌های مدیریت شهرها بوده است. در این میان، با توجه به این‌که استفاده از الگوریتم خودکاری یادگیر می‌تواند در محیط‌های تصادفی به شکل مناسبی عمل کند، می‌تواند به‌عنوان مدلی برای سیستم‌های یادگیر مفید باشد و هدف این پژوهش نیز پیشنهاد روش‌هایی مبتنی بر الگوریتم خودکار برای کنترل چراغ راهنمایی هوشمند است. از طرف دیگر باید در نظر داشت که در مسائلی مانند کنترل ترافیک، دسترسی اولیه به جواب بهینه امکان پذیر نیست و در نتیجه باید از روش‌هایی که در آنها احتیاج به دانش اولیه وجود ندارد استفاده کرد؛ از جمله این روش‌ها می توان به یادگیری تقویتی اشاره کرد.

در این پژوهش، روش‌های متعددی برای کنترل و مدیریت ترافیک در یک چهارراه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، نتایج به‌دست‌آمده توسط انواع مختلف الگوریتم خودکار جمع‌آوری شد و در ادامه، این نتایج با روش‌های دیگری که برای کنترل چراغ راهنمایی استفاده می‌شود، مورد مقایسه قرار گرفت. از آن‌جاکه تعداد اتومبیل‌هایی که منتظر عبور در یک تقاطع هستند، شاخصی است که کارآیی سیستم کنترل ترافیک را نشان می‌دهد، بنابراین از این شاخص در چرخه‌های سیگنالینگ به‌عنوان معیار ارزیابی عملکرد استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها بر روی دادگان جمع‌آوری شده در یکی از تقاطع شهر همدان، تأیید می‌کند که الگوریتم خودکار یادگیر با ساختار متغیر، عملکرد بهتری را از نظر میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار استاندارد ترافیک در بیشتر موارد در مقایسه با سایر انواع الگوریتم خودکارها و الگوریتم‌ها مانند یادگیری Q فراهم می‌کند؛ که این امر می‌تواند در کاهش ترافیک شهر همدان مفید واقع شود. دلیل استفاده از الگوریتم خودکار یادگیر، بلادرنگ بودن پاسخ پیش‌بینی‌کننده آن و تعامل دوطرفه آن با داده‌ها به‌صورت لحظه‌ای و آنی است. این پژوهش، نشان داد که روش پیشنهادی در سه وضعیت میانگین ترافیک، حداکثر وضعیت، حداقل ترافیک و انحراف معیار ترافیک در سه دوره زمانی، ترافیک خلوت، ترافیک متوسط و شلوغ، کارآمدترین توالی را در خصوص چراغ‌های راهنمایی شهر همدان نشان می‌دهد و کاهش محسوس ترافیک، از نتایج استفاده از آن در چراغ‌های راهنمایی هوشمند است.

در پژوهش (برزگر، داوودپور، میبدی و صادقیان، ۲۰۱۱، ص ۵۶۴) نشان داده شد که روش ترکیبی الگوریتم خودکار یادگیر با منطق فازی در راه‌بندهای الکترونیکی، می‌تواند ترافیک پشت راه‌بندهای الکترونیکی بعضی از معبرها را به‌طورخاص کاهش دهد، بنابراین می‌توان ادعا کرد نتایج پژوهش حاضر نیز منطبق بر این پژوهش است و الگوریتم

خودکار یادگیر نیز توانسته است در زمینه پیش‌بینی و کنترل چراغ‌های راهنمایی‌ورانندگی، نتایج بهینه‌ای را از خود نشان دهد. پژوهش (سو، کیو، دی، ما و لی[1]، ۲۰۱۸، ص ۶۲۶)، جوباوا، یزیدی، اومن و بگنام[2]، ۲۰۱۹، ص ۳۰۹)، (والکانیز، بلوتسیوتی، نیکوپولیتیدس و واراجیوس[3]، ۲۰۲۰، ص ۴)، (پونیتا و مالا[4]، ۲۰۲۱، ص ۲۲) و مقیسه و حیدری (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که می‌توان با الگوریتم خودکار یادگیر، ترافیک شبکه را برای ساعات آتی پیش‌بینی کرد و ویژگی‌های جدیدی برای تشخیص ترافیک ارائه کرد، که نتایج این پژوهش منطبق بر نتایج پژوهش حاضر درخصوص پیش‌بینی ترافیک و کاهش ترافیک است. پژوهش (شینکافی، بلو، شعایبو، میتچل[5]، ۲۰۱۹، ص ۵) نشان داد که الگوریتم کیو لرنینگ نیز مانند آتامای یادگیر در پیش‌بینی ترافیک نقش کارآمد و به‌سزایی دارد و می‌تواند تا حد مطلوبی، توالی ترافیک تا حد مشخصی را پیش‌بینی کنند که با مقایسه با نتایج پژوهش حاضر مشخص شد تا حد ۲۰ درصد اختلاف در نتایج وجود دارد.

درنهایت می‌توان ادعا کرد استفاده از روش پیشنهادی این پژوهش، می‌تواند شامل مزیت‌های مهمی هم‌چون کاهش ترافیک براساس هوشمندی در پیش‌بینی سیکل بعدی چراغ راهنمایی به‌صورت لحظه‌ای باشد. مزیت دوم، یادگیری سامانه است که پس از طی یک مدت اجرا دیگر نیاز به حس‌کردن محیط نیست و به خبرگی (در حد ۹۵ درصد مقدار صحت و ۵درصد خطا) خواهد رسید، اصولاً حداکثر زمان یادگیری برای این‌گونه الگوریتم در محیطی با متغیرهایی نزدیک به ۱۰۰ مورد، حدود ۲ ماه است (آکسوی و گونس[6]، ۲۰۱۹، ص ۵). مزیت سوم نیز می‌توان به کاهش بار محاسباتی قبل و پس از

1. Su, Qi, Di, Ma & Li
2. Jobava, Yazidi, Oommen & Begnum
3. Valkanis, Beletsioti, Nicopolitidis, Papadimitriou & Varvarigos
4. Punitha & Mala
5. Shinkafi
6 Aksoy & Gunes

یادگیری از محیط اشاره کرد که این الگوریتم یکی از الگوریتم‌هایی است که می‌تواند محاسبات سنگین یک چهارراه را زیر یک ثانیه انجام دهد.

پیشنهادها

کاربرد این پژوهش را می‌توان به‌طور محسوس در سازمان‌های راهنمایی و رانندگی شهر همدان، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری همدان، سازمان محیط‌زیست همدان و کلیه سازمان‌هایی دانست که به‌دنبال کاهش ترافیک، کاهش آلودگی هوا و بهینه‌سازی رفت و آمد در شهر همدان هستند. بنابراین به سازمان‌های مربوطه و سیاست‌گذار در این زمینه از جمله شهرداری همدان، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری همدان پیشنهاد می‌شود با تعبیه این سامانه با استفاده از به‌کار بردن شبیه‌ساز الگوریتم پیشنهادی این پژوهش بر بردهای الکترونیکی موجود که به‌صورت پیش‌فرض در چراغ‌های راهنمایی و رانندگی متصل است، به هوشمندسازی توالی روشن و خاموش‌شدن آنها کمک کنند و از این طریق بتوانند ترافیک موجود در پشت ترافیک چهارراه‌ها را بهینه‌تر کنند.

هم‌چنین به راهنمایی و رانندگی همدان پیشنهاد می‌شود با بازخوردگرفتن از خروجی این سامانه، مقدمات لازم برای پیاده‌سازی نهایی آن در سایر چهارراه‌های دیگر شهرهای کشور را فراهم کنند.

پیشنهاد بعدی، اجرای این سامانه به‌صورت همه‌جانبه و هم‌زمان در شهر است؛ چرا که روند اتصال آنها بایستی به‌صورت شبکه‌ای و یک‌پارچه مدیریت شود. درنهایت پس از طی‌کردن چندین ماه، از مجموعه دادگان آن برای بهره‌برداری در علم داده‌کاوی در جهت بهبود خدمات ترافیکی و اصلاحات مهندسی ترافیک استفاده کنند.

درنهایت به شرکت‌های دانش‌بنیان علوم مهندسی در حوزه سخت‌افزار پیشنهاد می‌شود با به‌کارگیری این سامانه برروی ریزپردازنده‌های آرم، اف‌پی‌جی‌ای، آردواینو و غیره و

شبکه‌سازی آنها با یکدیگر، زمینه تولید و استفاده انبوه آن در داخل کشور را فراهم کنند و پس از طی‌کردن مراحل تجاری‌سازی، به کشورهای دیگر نیز صادر کنند.

سپاسگزاری

در پایان، نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از جناب آقای دکتر حسام حیدری که صمیمانه در این پژوهش نهایت همکاری را داشتند، اعلام کنند.

منابع

حاجی‌حسینلو، منصور؛ قائمی، سیدعلی. (۱۳۹۲). ارزیابی اثر زمان‌بندی هوشمند تقاطع‌ها بر جریان ترافیک و آلودگی هوای شبکه‌های ترافیکی درون شهری. فصلنامه علمی مطالعات مدیریت ترافیک، ۱۳۹۲(۲۹)، ۱-۱۴. http://tms.jrl.police.ir/article_18525.html

حسن‌زاده، محمدرضا؛ احدی، محمدرضا. (۱۳۹۵). ارزیابی شناسگرهای سامانه حمل‌ونقل هوشمند به‌منظور مدیریت ترافیک. فصلنامه علمی مطالعات مدیریت ترافیک، ۱۳۹۵ (۴۲)، ۱۵-۳۶. http://tms.jrl.police.ir/article_18601.html

حامدی، ارکیده؛ ترابی، محمدامین؛ رفیعی‌نیا، محمد؛ اسفندیاری، نوید. (۱۳۹۹). طراحی و تبیین مدلی جهت پیش‌بینی و مکان‌یابی خودپردازهای سودده بانک تجارت شهر همدان با رویکرد امنیت و پیشگیری از سرقت با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی. فصلنامه علمی دانش انتظامی همدان. (۴)۷، ۱۸-۱. Doi: 10.22034/hpsj.2021.95883

Aksoy, A. & Gunes, M.H. (2019). Automated iot device identification using network traffic. In ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761559

Ali, M.; Devi, G.L. & Neelapu, R. (2021). Intelligent Traffic Signal Control System Using Machine Learning Techniques. In

Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications (pp. 611-619). Springer .https://doi.org/10.1007/978-981-15-3828-5_63

Ambekar, S.; Jawalkar, S.; Patil, A. & Patil, S. (2017). Intelligent traffic light controller using embedded system. https://www.academia.edu/download/53620533/IRJET-V4I2402.pdf

Barzegar, S.; Davoudpour, M.; Meybodi, M.R., Sadeghian, A. & Tirandazian, M. (2011). Formalized learning automata with adaptive fuzzy coloured Petri net; an application specific to managing traffic signals. Scientia Iranica, 18(3), 554-565. https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.04.007

Cai, J.; Zhang, Y. & Cai, H. (2019). Two-step long short-term memory method for identifying construction activities through positional and attentional cues Automation in Construction, 106, 102886. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102886

Evsutin, O. & Kultaev, P. (2021). An algorithm for embedding information in digital images based on discrete wavelet transform and learning automata. Multimedia Tools and Applications, 80(7), 11217-11238. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10316-7

Farahbakhsh, F.; Shahidinejad, A. & Ghobaei-Arani, M. (2021). Multiuser context-aware computation offloading in mobile edge computing based on Bayesian learning automata. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 32(1), e4127. https://doi.org/10.1007/s12652-021-03030-1

Fukuda, A.; Segawa, E. & Watanabe, S. (2021). Cellular automata traffic flow model derived through the ultradiscrete limit of the correlated random walk. arXiv preprint arXiv: 2104.14009. https://arxiv.org/abs/2104.14009

Garí, Y.; Monge, D.A.; Pacini, E.; Mateos, C. & Garino, C.G. (2021). Reinforcement learning-based application autoscaling in the cloud: A survey. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 102, 104288. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104288

Ghavipour, M. & Meybodi, M.R. (2016). An adaptive fuzzy recommender system based on learning automata. Electronic

Commerce Research and Applications, 20, 105-115. https://doi.org/10.1016/j.elerap.2016.10.002
Gregurić, M.; Vujić, M.; Alexopoulos, C. & Miletić, M. (2020). Application of deep reinforcement learning in traffic signal control: An overview and impact of open traffic data. Applied Sciences, 10(11), 4011 .https://doi.org/10.3390/app10114011
Hu, W.; Wang, H.; Yan, L. & Du, B. (2016). A swarm intelligent method for traffic light scheduling: application to real urban traffic networks. Applied Intelligence, 44(1), 208-231. https://doi.org/10.1007/s10489-015-0701-y
Jobava, A.; Yazidi, A.; Oommen, B.J. & Begnum, K. (2018). On achieving intelligent traffic-aware consolidation of virtual machines in a data center using Learning Automata. Journal of computational science, 24, 290-312. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.08.005
Khalid, M. (1996). Intelligent traffic lights control by fuzzy logic. Malaysian Journal of Computer Science, 9(2), 29-35. https://jati.um.edu.my/index.php/MJCS/article/view/2995
Khojasteh, M.R. & Meybodi, M.R. (2005). Using Learning Automata in Cooperation among Agents in a Team. In 2005 portuguese conference on artificial intelligence (pp. 306-312). https://doi.org/10.1109/EPIA.2005.341235
Khorasani-Zavareh, D. & Sharifian, S. (2017). Challenges of establishing a traffic surveillance system in Iran: the requirement of providing a unified definition for "traffic surveillance system". Safety promotion and injury prevention (Tehran), 5(2), 59-60. https://doi.org/10.5249/jivr.v11i2.1228
Kiran, B.R.; Sobh, I.; Talpaert, V.; Mannion, P.; Al Sallab, A.A.; Yogamani, S. & Pérez, P. (2021). Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems .https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3054625
Kumar, N.; Misra, S. & Obaidat, M.S. (2014). Collaborative learning automata-based routing for rescue operations in dense urban regions using vehicular sensor networks. IEEE Systems Journal, 9(3), 1081-1090. https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2335451

Mahdaviani, M.; Kordestani, J.K.; Rezvanian, A. & Meybodi, M.R. (2015). LADE: learning automata based differential evolution. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 24(06), 1550023 . https://doi.org/10.1142/S0218213015500232

Masoumi, B. & Meybodi, M.R. (2012). Learning automata based multi-agent system algorithms for finding optimal policies in Markov games. Asian Journal of Control, 14(1), 137-152. https://doi.org/10.1002/asjc.315

Miao, L. & Xu, L. (2017). Toward Intelligent Traffic Light Control with Quality-of-Service Provisioning. In ITITS (pp. 290-298). https://arxiv.org/pdf/1705.05440

Moghiseh, P. & Heydari, A. (2018). Congestion control in wireless sensor networks using learning automata. International Journal of Computer Science and Wireless Network, 3(2), 157-165. https://www.academia.edu/download/57210181/28.2.pdf

Narendra, K.S.; Wright, E.A. & Mason, L.G. (1977). Application of learning automata to telephone traffic routing and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 7(11), 785-792. https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309623

Pang, J. (2016). Intelligent traffic light controller design using FPGA digest of technical papers. In 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) (pp. 449-452). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCE.2016.7430687

Prashanth, L.A. & Bhatnagar, S. (2011). Reinforcement learning with average cost for adaptive control of traffic lights at intersections. In 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 1640-1645). IEEE.https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6082823

Punitha, V. & Mala, C. (2021). Traffic classification for efficient load balancing in server cluster using deep learning technique. The Journal of Supercomputing, 1-25. https://doi.org/10.1007/s11227-020-03613-3

Rademacher, K. (2017). The Influence of Sensor-Based Intelligent Traffic Light Control On Traffic Flow In Dublin. https://doi.org/10.21427/D7J89B

Rasouli, N.; Meybodi, M.R. & Morshedlou, H. (2013). Virtual machine placement in cloud systems using learning automata. In 2013 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC) (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/IFSC.2013.6675616
Rezvanian, A. & Meybodi, M.R. (2015). Finding maximum clique in stochastic graphs using distributed learning automata. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 23(01), 1-31. https://doi.org/10.1142/S0218488515500014
Roess, R.P.; Prassas, E.S. & McShane, W.R. (2011). Traffic Engineering. 2nd. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34480-1_8
Rosyadi, A.R.; Wirayuda, T.A.B. & Al-Faraby, S. (2016). Intelligent traffic light control using collaborative Q-Learning algorithms. In 2016 4th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoICT.2016.7571925
Saito, M. & Fan, J. (2000). Artificial neural network–based heuristic optimal traffic signal timing. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 15(4), 293-307. https://doi.org/10.1111/0885-9507.00192
Shakeri, M.; Deldari, H.; Rezvanian, A. & Foroughi, H. (2008). A novel fuzzy method to traffic light control based on unidirectional selective cellular automata for urban traffic. In 2008 11th International Conference on Computer and Information Technology (pp. 300-305). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCITECHN.2008.4803071
Sharma, M.; Bansal, A.; Kashyap, V.; Goyal, P. & Sheikh, T.H. (2021). Intelligent Traffic Light Control System Based On Traffic Environment Using Deep Learning. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1022, No. 1, p. 012122). IOP Publishing. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1022/1/012122/pdf
Shinkafi, N.A.; Bello, L.M.; Shu'aibu, D.S. & Mitchell, P. (2019). Learning Automata Based Q-Learning RACH Access Scheme for Cellular M2M Communications. In 2019 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCIoT) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/GCIoT47977.2019.9058419

Su, Y.; Qi, K.; Di, C.; Ma, Y. & Li, S. (2018). Learning automata based feature selection for network traffic intrusion detection. In 2018 IEEE Third International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC) (pp. 622-627). IEEE. https://doi.org/10.1109/DSC.2018.00099

Sutton, R.S. & Barto, A.G. (2011). Reinforcement learning: An introduction. In: Cambridge, MA: MIT Press. https://www.academia.edu/download/54674740/Reinforcement_Learning.pdf

Trabia, M.B.; Kaseko, M.S. & Ande, M. (1999). A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 7(6), 353-367. https://doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00026-1

Urbat, H. & Schröder, L. (2020). Automata learning: An algebraic approach. Proceedings of the 35th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science. https://doi.org/10.1145/3373718.3394775

Valkanis, A.; Beletsioti, G.A.; Nicopolitidis, P.; Papadimitriou, G. & Varvarigos, E. (2020). Reinforcement Learning in Traffic Prediction of Core Optical Networks using Learning Automata. In 2020 International Conference on Communications, Computing, Cybersecurity and Informatics (CCCI) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCCI49893.2020.9256655

Waheed, A.; Krishna, P.V.; Gitanjali, J.; Sadoun, B. & Obaidat, M. (2021). Learning automata and reservation based secure smart parking system: Methodology and simulation analysis. Simulation Modelling Practice and Theory, 106, 102205. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102205

Wei, H.; Zheng, G.; Gayah, V. & Li, Z. (2021). Recent advances in reinforcement learning for traffic signal control: A survey of models and evaluation. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 22(2), 12-18. https://doi.org/10.1145/3447556.3447565

Yasinian, H. & Esmaeilpour, M. (2021). Distributed learning automata based approach to inferring urban structure via traffic flow. Applied Intelligence, 1-13. https://doi.org/10.1007/s10489-021-02465-5

Younes, M.B.; Boukerche, A. & Mammeri, A. (2016). Context-aware traffic light self-scheduling algorithm for intelligent transportation systems. In 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564924

Zhang, B. & Wang, H. (2021). A new type of dual-scale neighborhood based on vectorization for cellular automata models. GIScience & Remote Sensing, 58(3), 386-404. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1883946

Zhong, J. & Liao, H. (2017). Research on the applications of electronic information technology in intelligent traffic light signal control. In Proceedings of International Conference on Computing, Communications and Automation (I3CA'17). HTTPS://DOI.ORG/10.1080/15481603.2021.1883946