

## ارزیابی عملکرد تقاطع‌های چراغ‌دار با رویکرد کنترل هوشمند (مورد پژوهی محدوده کنترل آلودگی هوای تهران)

### مقاله علمی - پژوهشی

علی رحمانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیررضا ممدوحی\*<sup>‡</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

و استاد وابسته، دانشکده مهندسی عمران، زمین‌شناسی و معدن، دانشگاه فنی مونترال، کانادا

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [armamdoohi@modares.ac.ir](mailto:armamdoohi@modares.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۷۸-۶۵

### چکیده

با افزایش جمعیت در مناطق شهری و روستایی، سیستم حمل‌ونقل کارایی کمتری برای مدیریت روزافزون تقاضا دارد. کمبود فضا و منابع برای بهبود زیرساخت‌ها، باعث مشکلاتی می‌شود که زندگی شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش تقاضا برای جابجایی می‌تواند بر پارامترهای زیست‌محیطی، ترافیکی و ایمنی تأثیر بگذارد. از این میان، تقاطع‌ها را می‌توان به‌عنوان کانون‌های اصلی ازدحام، تأخیر، انتشار آلاینده و نقاطی پرخطر از لحاظ ایمنی نام برد. این وضعیت، چالشی اساسی را برای بهبود و کنترل بهینه ترافیک در چارچوب زیرساخت‌های فعلی ارائه می‌دهد. در این مطالعه ابتدا تقاضای موجود با استفاده از الگوریتم انتخاب مسیر گاورون به صورت پویا، در ۵ تکرار تخصیص داده می‌شود. سپس عملکرد ۵ سناریو برای نحوه کنترل تقاطع‌های چراغ‌دار که شامل دو رویکرد هوشمند سازی مبتنی بر فاصله زمانی و مبتنی بر تأخیر است، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی خردنگر در محدوده کنترل آلودگی هوای تهران در سه بعد ایمنی، زیست‌محیطی و ترافیکی، بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هوشمندسازی تقاطع‌های چراغ‌دار می‌تواند طول صف را تا حدود ۶۴ درصد و میزان مصرف سوخت را تا حدود ۱۶ درصد کاهش دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند گردانندگان سیستم حمل‌ونقل را در تصمیم‌گیری در ارتباط با نحوه هوشمندسازی تقاطع یاری کند.

واژه‌های کلیدی: تقاطع چراغ‌دار، تقاطع هوشمند، شبیه‌سازی خردنگر، چراغ راهنمایی هماهنگ، چراغ راهنمایی هوشمند

### ۱-مقدمه

ترافیک برای اولین بار در اوهایو<sup>۱</sup>، در سال ۱۹۰۸، انجام شد. هرچند اولین چراغ راهنمایی سه رنگ در سال ۱۹۲۰ اختراع و در سال ۱۹۳۰ در میشیگان مورد استفاده قرار گرفت؛ اما تاکنون تلاش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی و توسعه چراغ‌های راهنمایی انجام شده است (Arifin and Zulkifli, 2021). به‌طور معمول، برای کنترل ترافیک در تقاطع‌ها، از چراغ‌های راهنمایی استفاده می‌شود که الگوی زمان‌بندی آن‌ها می‌تواند

تقاطع‌ها بخشی ضروری و درعین‌حال خطرناک از شبکه حمل‌ونقل هستند. در آمریکا حدود ۴۰ درصد از تصادف وسایل نقلیه موتوری در تقاطع‌ها رخ می‌دهد. در استرالیا هم رانندگان در تقاطع‌ها نسبت به بخش‌های میانی شبکه، سه تا چهار برابر بیشتر درخطر تصادف هستند. تصادف‌های درون‌شهری در تقاطع‌های چهار طرفه کنترل‌شده، مرگ‌بارتر و از لحاظ جرحی، جدی‌تر هستند (Stephens et al., 2017). مکانیسم کنترل

## ۲- پیشینه تحقیق

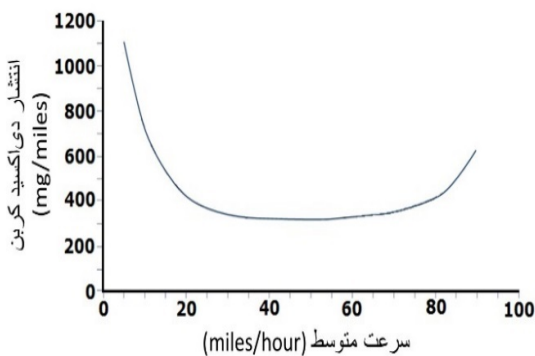
با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات بسیاری در تلاش برای بهینه‌سازی عملکرد چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌های کنترل‌شده انجام شده است. لی و همکاران (Li et al., 2020) ابتدا یک مدل بهینه‌سازی چراغ راهنمایی بر اساس رفتار اتوبوس‌ها طراحی کردند. این مدل باهدف کاهش تأخیر سفر ایجادشده است و فعالیت‌های اتوبوس‌ها را در ایستگاه، به‌طور آماری موردبررسی قرار می‌دهد. سپس، از یک روش تحلیل جریان معادل<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند تا تأثیر حضور اتوبوس‌ها بر تغییر خط و ورود و خروج از نقاط توقف ایستگاه را ارزیابی کنند. این تأثیر به‌منظور یکپارچه‌سازی، با الگوریتم بهینه‌سازی سیگنال‌های ترافیکی تقاطع‌ها ادغام می‌شود. آن‌ها درنهایت مدل بهینه‌سازی سیگنال پیشنهادی را بر اساس داده‌های ترافیکی بلادرنگ جمع‌آوری‌شده از نانچینگ<sup>۳</sup> چین اعتبار سنجی کرده که نتایج نشان می‌دهد مدل بهبودیافته می‌تواند تأخیر سفر وسیله نقلیه را تا ۴/۳ درصد در تقاطع آزمایش‌شده کاهش دهد. در مطالعه‌ای دیگر، یک چارچوب توزیع‌شده به‌صورت زمان واقعی پیشنهاد شده است تا سطح ترافیک واقع شده در شبکه‌های جاده‌ای شهری با استفاده از شبکه‌های وایرلس مبتنی بر وسایل نقلیه<sup>۴</sup>، بر اساس عامل ایجاد، رده‌بندی شود. مقاله مدلهایی را بر اساس مفهوم اندازه‌گیری فضایی و زمانی مبتنی بر داده‌های ترکیبی، به‌دست‌آمده از یک مطالعه موردی خاص، را پیشنهاد می‌دهد. این چارچوب می‌تواند به گردانندگان سیستم حمل‌ونقل کمک کند تا با داشتن دانشی از علل اصلی ازدحام، استراتژی‌های مؤثری برای کاهش ترافیک شهری توسعه دهند (Al Mallah et al., 2017). بانو و همکاران (Banu et al., 2022) یک سیستم کنترل چراغ راهنمای ترافیک هوشمند را با استفاده از پردازش و تشخیص تصویر برای مدیریت ترافیک توسعه داده‌اند. در این مطالعه از فن‌های پردازش تصویر، تشخیص لبه کانی<sup>۵</sup> و همخوانی تصویر استفاده شده است. نتیجه این مطالعه، کاهش زمان انتظار در تقاطع‌ها، ایجاد شرایط عبور آسان‌تر برای عابران و افراد با نیازهای ویژه، افزایش ایمنی و بهبود کلی مدیریت ترافیک شهری را نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای دیگر (Kuang et al., 2021)، یک روش کنترل سیگنال ترافیکی بر پایه یادگیری تقویتی<sup>۱</sup> ارائه شده است که باعث بهبود عملکرد ترافیکی در تقاطع‌های منفرد می‌شود. ابتدا، با استفاده از پیشینه داده‌های جریان ترافیک، یک مدل

ایستا یا پویا باشد. در مدل ایستا، زمان و ترتیب چراغ‌های سبز، زرد و قرمز از پیش تعیین‌شده است؛ درحالی‌که در مدل پویا بر اساس ارزیابی محیطی و شدت ترافیک، زمان‌بندی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که ازدحام ترافیک کاسته شود (Mortazavi, Azad and Ramazani, 2023).

تقاطع‌های کنترل‌شده با چراغ راهنمایی ناکارآمد، تأثیر زیادی بر رانندگان دارد؛ باعث ناامیدی و خستگی شده و درنهایت منجر به رفتارهای پرخطر در ترافیک جاده‌ای می‌شود (Ostrowski and Budzynski, 2019). شواهد نشان می‌دهد، تقاطع‌های چراغ‌دار به دلیل توالی چرخه توقف و حرکت، باعث افزایش تأخیر شده و همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با کاهش سرعت، میزان انتشار آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند. همین امر سبب می‌شود تقاطع‌ها به‌عنوان کانون‌های اصلی انتشار آلاینده زیست‌محیطی در شبکه حمل‌ونقل شناخته شوند (Goel and Kumar, 2014).

بیشتر شهرهای جهان با مشکل آلودگی هوا مواجه هستند (Goel and Kumar, 2014). این درحالی است که جمعیت در حال افزایش و نیاز به جابجایی روندی صعودی دارد. تهران در بین آلوده‌ترین پایتخت‌های جهان، رتبه ۲۱ را به خود اختصاص داده است (IQAir, 2022). هرچند طرح‌های ترافیکی مختلفی برای بهبود وضعیت هوای این کلان‌شهر انجام شده، اما همچنان آلودگی هوا یکی از دغدغه‌های ساکنین این کلان‌شهر است. در این مطالعه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی سناریوهایی برای تقاطع‌های چراغ‌دار محدوده کنترل آلودگی هوای شهر تهران پیشنهاد و در ابعاد مختلف ایمنی، زیست‌محیطی و ترافیکی بررسی می‌شود.



شکل ۱. ارتباط بین سرعت متوسط خودرو و انتشار دی‌اکسید کربن (Shahid et al., 2014)

(Wiesenthal, 1999). بر اساس مطالعات، عواملی نظیر باریک شدن جاده‌ها، تراکم ترافیک و چراغ‌های راهنمایی، موجب ایجاد ازدحام می‌شوند. روش سنتی چراغ‌های راهنمایی، یعنی چرخه ثابت، امروزه به علت افزایش تراکم و ترافیک، به ویژه در معابری که حجم ترافیک بالایی دارند، ناکارآمد تلقی می‌شود. بنابراین، نیاز به یک مکانیسم هوشمند و تطبیقی برای تنظیم زمان بندی چراغ‌های راهنمایی به منظور مدیریت بهتر شرایط جریان ترافیک حس می‌شود. این نوع مکانیسم جدید، منجر به ابداع اصطلاح چراغ راهنمایی هوشمند<sup>۸</sup> شده است. از این طریق، با تخصیص هوشمندانه زمان بندی چراغ‌ها بر اساس شرایط فعلی جریان ترافیک، امکان بهبود کارایی و مدیریت بهتر ترافیک در شهرها و معابر فراهم می‌شود (Arifin and Zulkifli, 2021).

ترافیک یک سیستم پیچیده است که تحت تأثیر عوامل زیادی قرار دارد. همین امر باعث می‌شود که اثر سنجی یک سیاست جدید روی ترافیک به وسیله مدل‌های تحلیلی دشوار و یا غیرممکن باشد؛ این در حالی است که مدل‌های شبیه‌سازی امکان ایجاد یک چارچوب برای فرمول بندی یک مسئله پیچیده را فراهم می‌کنند (Song et al., 2013).

در زمینه مدل‌های شبیه‌سازی ترافیک، انواع مختلفی از مدل‌ها استفاده می‌شوند که شامل مدل‌های خردنگر<sup>۹</sup>، کلان‌نگر<sup>۱۰</sup> و میان‌نگر<sup>۱۱</sup> است (Lochrane, 2014). در این مطالعه از نرم‌افزار SUMO<sup>۱۲</sup> استفاده می‌شود که در واقع، یک نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیک خردنگر، پیوسته و چندوجهی<sup>۱۳</sup> است که می‌تواند ترافیک را در شبکه‌های بزرگ‌تر از یک شهر، مانند شبکه‌های بزرگراهی، مدل کند (Krajzewicz et al., n.d.; Lücken et al., 2019).

### ۳-۱- شبکه و داده تقاضا

این مطالعه روی محدوده کنترل آلودگی هوای شهر تهران انجام می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده است. برای ورود این شبکه از پایگاه داده‌ی openstreetmap استفاده می‌شود. شبکه مورد مطالعه از ۲۰۷۰ گره و ۳۳۱۹ کمان تشکیل شده که ۶۷ تقاطع این محدوده به صورت چراغ‌دار است که نحوه پراکنش این تقاطع‌ها در محدوده مورد مطالعه در شکل ۳ قابل مشاهده است. بدلیل در دسترس نبودن داده مربوط به نحوه

یادگیری تقویتی طراحی، سپس یک تابع پاداش دو هدفه معرفی می‌شود که بهینه‌سازی تخصیص زمان چراغ‌راهنمایی به تقاضای ترافیک و همچنین، کاهش تأخیر خودروها را هدف قرار می‌دهد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که این الگوریتم کنترل، بهبود قابل توجهی در ظرفیت تقاطع‌های منفرد ارائه می‌دهد و همچنین هزینه‌های زمان و فضای الگوریتم کنترل چراغ‌راهنمایی را کاهش می‌دهد. یادگیری تقویتی به صورت گسترده برای بهبود مدیریت ترافیک و بهینه‌سازی کنترل به کار می‌رود. با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق، یک روش بازیگر-انتقادی عمیق<sup>۷</sup> توسعه داده شده است که می‌تواند برنامه‌های بهینه سیگنال ترافیکی با کارایی بالا ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش از روش‌های مبتنی بر مدل اصلی و چندین روش یادگیری تقویتی عمیق موجود، از جمله اندازه صف، زمان تأخیر متوسط و ظرفیت انتقال، بهتر عمل می‌کند (Zhou et al., 2022).

یکی از رویکردهایی که محققان به منظور بهبود کارایی سفر و کاهش ازدحام در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، از آن بهره می‌برند، ترکیب بهینه‌سازی برنامه زمان بندی چراغ‌های راهنمایی و پیش‌بینی جریان‌های ترافیک، در قالب یک سیستم کنترل چراغ‌راهنمایی واحد است. هدف اصلی این رویکرد کاهش تعداد کلی خودروهای متوقف شده در تمام تقاطع‌های چراغ‌دار شبکه است (Jiang et al., 2021).

همان‌گونه که بررسی شد، مطالعات بسیاری پیرامون بهینه کردن عملکرد چراغ‌های راهنمایی، با اهداف و رویکردهای متفاوت انجام شده است؛ اما در این میان، توجه کمتری به مقایسه عملکرد آن‌ها در یک سناریو یکسان و در یک شبکه واقعی شامل چند زنجیره تقاطع چراغ‌دار شده است. علاوه بر این در این مطالعه با در نظر گرفتن سیاست‌های زمان بندی اعمال شده بر تقاطع چراغ‌دار در تخصیص تقاضا که به صورت تعادلی کاربر پویا انجام می‌شود، به مقایسه اثر هر سیاست بر شبکه در ابعاد مختلفی مانند ایمنی، ترافیکی و زیست محیطی پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- پیکربندی مدل

علاوه بر اثرات زمانی و اقتصادی، ازدحام بر رانندگانی که در ترافیک گرفتار شده‌اند، تأثیر منفی می‌گذارد. از دیدگاه روان‌شناختی، می‌توان بیان کرد که ازدحام احتمال استرس و رفتار پر خاشگروانه را افزایش می‌دهد (Hennessy and

### ۳-۲- سیاست‌های کنترل ترافیک در تقاطع

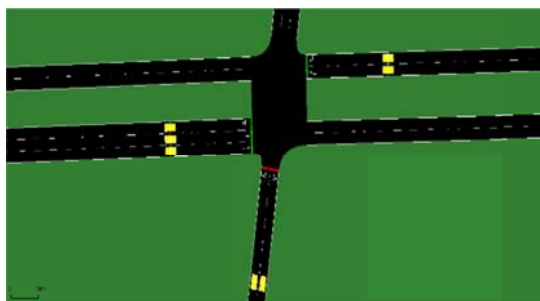
در این مطالعه ۵ سناریو برای چراغ‌های راهنمایی در نظر گرفته می‌شود:

۱. ایستا<sup>۱۴</sup> (stc): در این نوع از چراغ‌های راهنمایی، هر فاز دارای زمان ثابت از پیش تعیین شده است.

۲. ایستا هماهنگ (stc-q): مانند حالت ایستا، دارای فازبندی ثابت و از پیش تعیین شده است؛ با این تفاوت که در این سناریو، تقاطع‌های چراغ‌دار موجود در شبکه به صورت هماهنگ عمل می‌کنند.

۳. مبتنی بر فاصله<sup>۱۵</sup> (gapb): این رویکرد به عنوان یک روش متداول در آلمان شناخته می‌شود که بر اساس تشخیص جریان پیوسته ترافیک عمل می‌کند. در واقع، زمانی که یک جریان پیوسته ترافیک تشخیص داده می‌شود، بازه زمانی فازهای ترافیک را تمدید می‌کند. زمانی که یک فاصله زمانی کافی بین خودروها شناخته شود، این سیستم به فاز بعدی منتقل می‌شود. این اقدام باعث می‌شود که زمان‌های سبز، بصورت بهینه‌تری بین فازها توزیع شود و همچنین زمان چرخه باتوجه به شرایط ترافیکی تغییر کند. این رویکرد اجازه می‌دهد تا چرخه با شرایط متغیر ترافیک سازگار شود و در توزیع زمان سبز بهبود حاصل کند. در سیستم کنترل ترافیک مبتنی بر فاصله، از شناساگرهای حلقه‌ای القایی<sup>۱۶</sup> استفاده می‌شود که به‌طور خودکار در فواصل قابل تنظیم نصب می‌شوند. این شناساگرها از موقعیت و حرکت وسایل نقلیه اطلاعات جمع‌آوری کرده و فازهای کنترلی را بر اساس وضعیت ترافیک انتخاب می‌کنند. شکل ۴ نمونه‌ای از این شناساگرها را در محیط شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

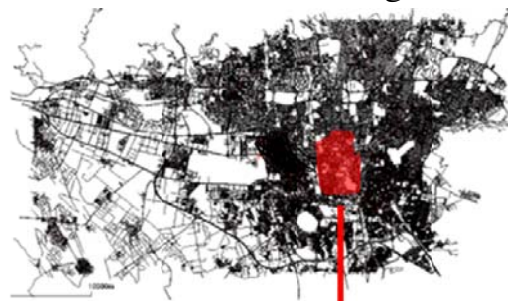
۴. مبتنی بر فاصله هماهنگ (gapb-q): مانند حالت مبتنی بر فاصله عمل می‌کند با این تفاوت که در این سناریو، تقاطع‌های چراغ‌دار موجود در شبکه به صورت هماهنگ عمل می‌کنند.



شکل ۴. یک تقاطع با سیستم کنترل ترافیک مبتنی بر فاصله همراه با شناساگرهای حلقه‌ای القایی

زمان‌بندی تقاطع‌های چراغ‌دار، زمان‌بندی این تقاطع‌ها از openstreetmap برداشت شده است.

در این مطالعه شبیه‌سازی با ۱۸۰۰۰ سفر انجام می‌شود که به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. سفرهای شبیه‌سازی شده در بازه یک ساعت به شبکه وارد می‌شوند که فاصله زمانی بین ورود به شبکه دارای توزیع نمایی است.



شکل ۲. شبکه محدوده مورد مطالعه (محدوده کنترل آلودگی هوای شهر تهران)



شکل ۳. پراکنش تقاطع‌های چراغ‌دار در محدوده مورد مطالعه

تنظیم سرعت مربوط به تغییر خط را بر عهده دارند. (Erdmann, 2015)

یکی از مدل‌های تعقیب، مدل کراوس<sup>۲۰</sup> است که در سال ۱۹۹۷ بر مبنای سرعت ایمن خودرو دنیال کننده ایجاد شده است. ایده اصلی تئوری تعقیب خودرو در این مدل، این است که تغییر در سرعت وسیله نقلیه  $i$ ، به سرعت وسیله نقلیه خودرو پیشرو  $i+1$  و همچنین تفاوت موقعیت (شکاف) و پارامترهای استاتیک مانند حساسیت یا زمان واکنش بستگی دارد (Krauss, 1998). سرعت ایمن توسط رابطه ۱ توصیف می‌شود. (J. Song et al., 2015)

$$V_{safe} = v_i(t) + \frac{g(t) - v_i(t)t_r}{\frac{v_i(t) - v_f(t)}{2b} + t_r} \quad (1)$$

که در آن  $V_{safe}$  سرعت ایمن،  $v_i(t)$  سرعت وسیله نقلیه پیشرو  $i$  در زمان  $t$ ،  $t_r$  زمان واکنش،  $g(t)$  شکاف بین دو خودرو در

زمان  $t$  و  $b$  حداکثر کاهش سرعت خودرو برحسب متر بر مجذور ثانیه است.

$V_{safe}$  ممکن است از حد مجاز سرعت در جاده تجاوز کند. به همین دلیل، سرعت دیگری به نام سرعت مطلوب در این مدل توصیف می‌شود که برابر حداقل سرعت بین سرعت ایمن، حداکثر سرعت و سرعتی است که قابلیت‌های شتاب در محاسبه آن در نظر گرفته می‌شود (J. Song et al., 2015). به عبارت دیگر:

$$v_{des} = \min[v_{max}, v + at, v_{safe}] \quad (2)$$

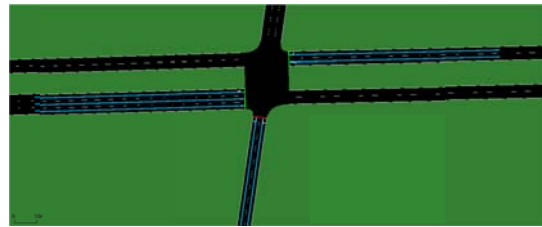
که در آن  $v_{des}$  سرعت مطلوب  $v_{max}$  حداکثر سرعت و  $a$  شتاب است.

انسان در نقش راننده می‌تواند ناقص باشد، به همین دلیل در مدل کراوس عبارت خطای تصادفی ( $\varepsilon$ ) می‌شود. رابطه ۳، محاسبه سرعت را با در نظر گرفتن نقص راننده نشان می‌دهد:

$$v = \max[0, rand[v_{des} - \varepsilon, v_{des}]] \quad (3)$$

در این مطالعه برای مدل تعقیب خودرو از مدل کراوس با پارامترهای فرض شده (جدول ۱) و برای مدل تغییر خط از مدل LC2013 استفاده می‌شود که همان حالت پیش فرض نرم‌افزار است.

۵. مبتنی بر تأخیر<sup>۱۷</sup> (delb): یکی دیگر از عواملی که می‌تواند باعث تمدید یک فاز در سیستم کنترل ترافیک شود، حضور وسایل نقلیه با احتساب زمان از دست‌رفته است. به عبارت دیگر، وقتی وسایل نقلیه با تأخیر، به نحوی در سیستم حضور داشته باشند که نیاز به تمدید یک فاز باشد، این تأخیر می‌تواند به عنوان یکی از عوامل مؤثر در تصمیم‌گیری برای تمدید فازها عمل کند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در این سیستم کنترل، از یک شناساگر محدوده‌ای<sup>۱۸</sup> استفاده می‌شود. وقتی یک خودرو وارد ناحیه تشخیص شناساگر می‌شود، یک زمان تحت عنوان زمان از دست‌رفته<sup>۱۹</sup> برای آن محاسبه می‌شود. اگر این زمان از مقدار تعیین شده بیشتر باشد، یک درخواست برای افزایش مدت زمان فاز سبز به سیستم ارسال می‌شود.



شکل ۵. یک تقاطع با سیستم کنترل ترافیک مبتنی بر تأخیر همراه با شناساگرهای محدوده‌ای

### ۳-۳- مدل‌های رفتار رانندگی

منطق رانندگی توصیف می‌کند که یک راننده، در شرایط واقعی ترافیکی، در دو جهت طولی و عرضی چگونه کار می‌کند. در جهت طولی، راننده با رعایت یک فاصله مناسب، حفظ سرعت موردنظر و کنترل شتاب، با هدف پیروی از خودروی پیشرو کار می‌کند. راننده باید با فاصله امنی از خودروی پیشرو، پیروی کرده و با توجه به شرایط جاده و جریان ترافیک، سرعت خود را تنظیم کند تا ایمن به مقصد برسد. علاوه بر این، پیش‌بینی موانع ممکن در جاده، بسیار حیاتی است. با تنظیم سرعت خود بر اساس شرایط، راننده می‌تواند سرعت خود را در صورت لزوم کاهش داده و از وقوع حوادث جلوگیری نماید (Lochrane, 2014). در جهت طولی، رفتار رانندگی، توسط مدل‌های تعقیب خودرو از طریق توزیع شتاب، فاصله‌های ایمن و زمان واکنش توصیف می‌شود. مدل‌های تعقیب در شرایط ترافیکی متفاوت، توسط محققان زیادی بررسی شده است (Hoogendoorn and Hoogendoorn, 2010). در مقابل، مدل‌های تغییر خط وظیفه انتخاب خط در جاده‌های چند خطه و

جدول ۱. مقدار پارامترهای فرض شده در مدل‌های رفتاری

	نماد	تعریف پارامتر (واحد)	
۱	accel	بیشینه شتاب افزایشی ( $m/s^2$ )	۲/۶
۲	decel	بیشینه شتاب کاهشی ( $m/s^2$ )	۴/۵
۳	sigma	میزان نقص راننده: بین صفر (رانندگی بدون نقص) و یک (راننده پر نقص)	۰/۵
۴	tau	کمینه سرفاصله زمانی مطلوب راننده (s)	۱
۵	minGap	کمینه شکاف تا خودرو پیشرو (m)	۲/۵

### ۳-۴- تخصیص تقاضا

زمانی که فرض می‌شود جریان در کمان، مستقل از زمان است، مسئله تخصیص به‌عنوان تخصیص ایستا شناخته می‌شود. اما در مقابل، اگر وابستگی زمانی در نظر گرفته شود، از تخصیص پویا صحبت می‌شود. تخصیص پویا هم از نظر محاسباتی و هم از نظر مفهومی بسیار پیچیده‌تر از تخصیص ایستا است. اما در واقعیت جریان در یک کمان هرگز مستقل از زمان نیست (Gawron, 2011). در نرم‌افزار SUMO یک الگوریتم یا روش اجرایی وجود دارد که به‌عنوان شرحی برای نحوه عملکرد یک سیستم ترافیکی معرفی شده است. این الگوریتم به‌طور متناوب شبیه‌سازی را اجرا می‌کند تا زمان‌های سفرها محاسبه شود. سپس برخی از وسایل نقلیه را بر اساس این زمان‌های سفر به مسیرهای جایگزین اختصاص می‌دهد. این فرایند برای تعداد مشخصی، بصورت گام‌های تکراری، تکرار می‌شود. هرچند تضمین نمی‌شود در این حالت تخصیص کامل تعادلی باشد اما افزایش تعداد تکرار، احتمال همگرایی به تعادل را افزایش می‌دهد. در نرم‌افزار مورد استفاده، دو روش گاورون<sup>۲۱</sup> و لوجیت<sup>۲۲</sup> برای انتخاب مسیر وجود دارد. ورودی این دو روش شامل یک تابع وزن یا هزینه برای هر یک از کمان‌های شبکه است. این وزن‌ها می‌توانند از شبیه‌سازی یا هزینه‌های پیش‌فرض به دست آید. در این مطالعه از روش گاورون برای انتخاب مسیر استفاده می‌شود که در ۵ مرحله تکرار می‌شود.

### ۴- تحلیل نتایج مدل

با گسترش استفاده از وسایل نقلیه در سراسر جهان، ترافیک در شبکه حمل‌ونقل پیچیده و آشفته شده است. یک شبکه

حمل‌ونقل مناسب می‌تواند مجموعه‌ای از مزایا را ارائه دهد؛ به‌ویژه در توسعه بخش‌های اجتماعی-اقتصادی، از جمله جریان ترافیک بهتر (با تمام مزایای ممکن) و محیطی مطبوع که باعث بهبود عملکرد اقتصادی می‌شود. یک سیستم مدیریت تطبیقی و پیوسته برای مقابله با این مسئله لازم است (Zerroug et al., 2023). بنابراین، سؤال این است که چگونه باید یک سیستم مدیریت هوشمند چراغ‌های راهنمایی طراحی کرد که توانایی برآورده کردن نیازهای شهرهای هوشمند در حال ظهور را داشته باشد یا بار سنگین ترافیک در تقاطع‌های بزرگ شهرهای سستی را کاهش دهد؟ در این مطالعه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی، ۱۸۰۰۰ سفر تصادفی، در بازه زمانی یک ساعت، به شبکه محدوده کنترل آلودگی هوای شهر تهران وارد شده که با استفاده از الگوریتم گاورون، بصورت تعادل کاربر، تخصیص داده می‌شوند. در نهایت، ۵ سناریو که نحوه کنترل زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌های چراغ‌دار در محدوده مورد مطالعه را توصیف می‌کنند، با نگاه ایمنی، زیست محیطی و ترافیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از پارامترهای بحرانی که برای ارزیابی عملکرد تقاطع‌های چراغ‌دار استفاده می‌شود، تأخیر و زمان انتظار است. هرچند نرخ‌های ورود و خروج وسایل نقلیه به تقاطع‌ها، رفتار رانندگان و ویژگی‌های وسایل بر تعیین تأخیر اثر می‌گذارد؛ اما نوع سیستم کنترل چراغ در تقاطع، از جمله پارامترهای تأثیرگذار است (Barhmaiah et al., 2022). در شکل ۶، زمان سفر، زمان انتظار و زمان ازدست‌رفته برای کل سفرهای انجام‌شده در شبکه، در ۵ سناریو قابل مشاهده است. در شکل ۶، قسمت الف، زمان سفر کل در شبکه بررسی شده است. هرچند در سناریو ایستا هماهنگ کردن تقاطع‌ها، زمان سفر کل در شبکه را حدود ۳ درصد کاهش می‌دهد، اما هوشمند سازی تقاطع‌ها، عملکرد بهینه‌تری دارد. مقدار این کاهش در سناریو مبتنی بر فاصله به ۱۳ درصد و در همین سناریو، اما به‌صورت هماهنگ، به ۱۶ درصد می‌رسد. بر اساس نتایج، بهینه‌ترین سناریو، کنترل کردن تقاطع مبتنی بر تأخیر است. در این سناریو، زمان سفر کل در شبکه نسبت به حالت ایستا، ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.

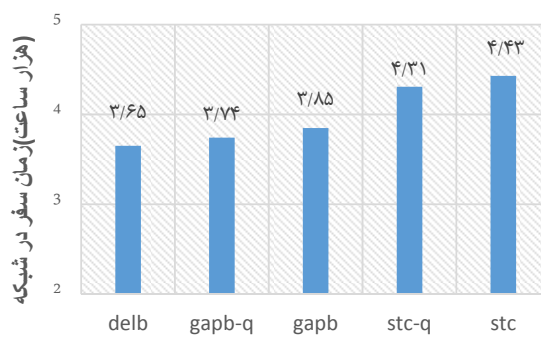
در شکل ۶، قسمت ب، تأثیر سناریوهای کنترل تقاطع بر زمان انتظار در شبکه، قابل مشاهده است. هماهنگ کردن تقاطع‌ها زمان انتظار در شبکه را کاهش می‌دهد. این کاهش در سناریو ایستا هماهنگ نسبت به سناریو ایستا، حدود ۱۳ درصد است.

منظور از زمان ازدست‌رفته در شکل ۶، قسمت ج، زمانی است که سرعت خودرو کمتر از سرعت مطلوب راننده است. هماهنگ کردن تقاطع‌ها تأثیر مثبتی بر زمان ازدست‌رفته دارد. هرچند سناریو مبتنی بر فاصله، نسبت به سناریو ایستا، زمان ازدست‌رفته را حدود ۴۲ درصد کاهش می‌دهد؛ اما در سناریو مبتنی بر تأخیر، میزان این کاهش به ۴۸ درصد می‌رسد.

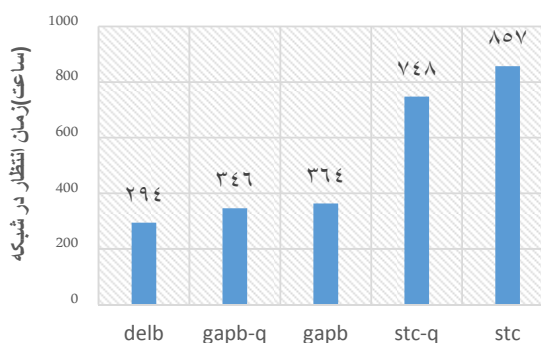
صف و زمان بودن در صف، از جمله عواملی هستند که تأثیر زیادی بر رانندگان دارند و امکان دارد زمینه‌ساز رفتارهای پرخطر در ترافیک جاده‌ای شود. تأخیر یا طول صف حاصل، به سیاست انتخابی برای توزیع جریان‌های ورودی و زمان‌های سبز متناظر در لینک وابسته است (Keyvan-Ekbatani et al., 2021).

در شکل ۷، تأثیر سناریوهای کنترلی پیشنهاد شده بر الف: زمان بودن در صف و ب: طول صف در تقاطع‌ها، بر اساس زمان شبیه‌سازی، قابل مشاهده است. بر اساس قسمت الف، می‌توان گفت هماهنگ کردن تقاطع‌هایی که به شکل ایستا کنترل می‌شوند، مجموع زمان بودن در صف را حدود ۱۶ درصد کاهش می‌دهد. هرچند سناریو مبتنی بر فاصله نسبت به سناریو ایستا، میزان بودن در صف را ۵۳ درصد کاهش می‌دهد، اما هماهنگ‌سازی این تقاطع‌ها، میزان این کاهش را به ۵۷ درصد می‌رساند. باین وجود، بیشترین مقدار کاهش، در سناریو مبتنی بر تأخیر مشاهده می‌شود که این سناریو را به‌عنوان بهینه‌ترین سناریو کنترلی در کاهش زمان بودن در صف معرفی می‌کند. میزان کاهش در این سناریو نسبت به سناریو ایستا به ۶۴ درصد می‌رسد. در شکل ۷، قسمت ب، تأثیر سناریوهای بر طول صف در تقاطع‌ها مشاهده می‌شود. روشن است که هوشمند و هماهنگ‌سازی چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌ها، به‌طور قابل‌توجهی طول صف در این نقاط را کاهش می‌دهد. هماهنگ کردن تقاطع‌هایی که به‌صورت ایستا کنترل می‌شوند، باعث می‌شود مجموع طول صف در شبکه، حدود ۱۲ درصد کاهش یابد. سناریو مبتنی بر فاصله، در حالت عادی و در حالت هماهنگ شده، طول صف در تقاطع‌ها را نسبت به سناریو ایستا، به ترتیب ۵۹ و ۶۲ درصد کاهش می‌دهد. سناریو مبتنی بر تأخیر با کاهش ۶۸ درصدی طول صف در تقاطع‌ها، عملکردی بهینه را نشان می‌دهد.

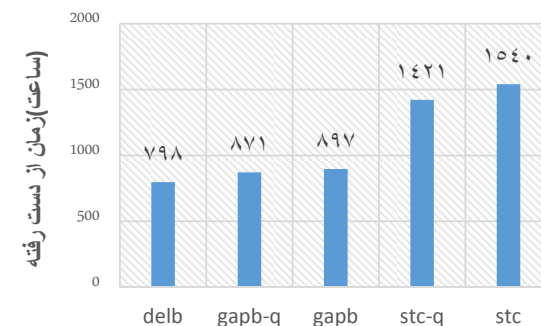
هماهنگ کردن چراغ‌های راهنمایی و ادغام آن با هوشمند سازی تقاطع‌ها، زمان انتظار در شبکه را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. سناریو مبتنی بر فاصله هماهنگ، نسبت به سناریو ایستا، زمان انتظار در شبکه را حدود ۵۸ درصد کاهش می‌دهد. عملکرد سناریو کنترل مبتنی بر تأخیر، این کاهش را به حدود ۶۶ درصد بهبود می‌بخشد.



الف: زمان سفر  
سناریوهای کنترل تقاطع چراغدار

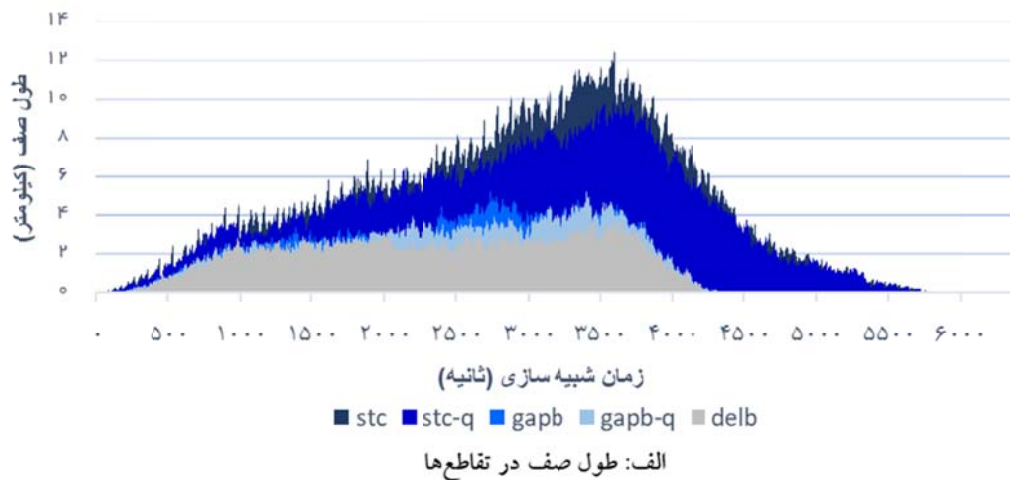


ب: زمان انتظار  
سناریوهای کنترل تقاطع چراغدار

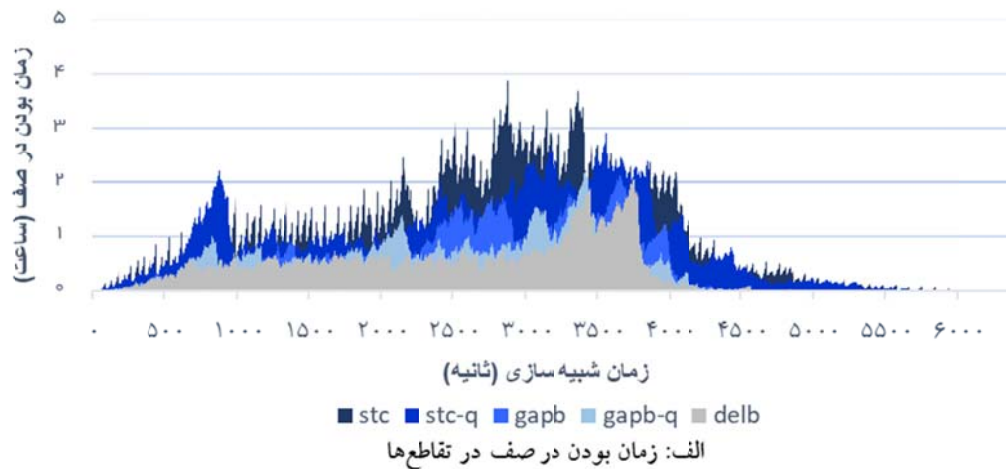


ج: زمان ازدست‌رفته  
سناریوهای کنترل تقاطع چراغدار

شکل ۶. تأثیر سناریوهای کنترل تقاطع چراغدار بر الف: زمان سفر  
ب: زمان انتظار و ج: زمان ازدست‌رفته،  
به تفکیک سیاست کنترل تقاطع‌ها



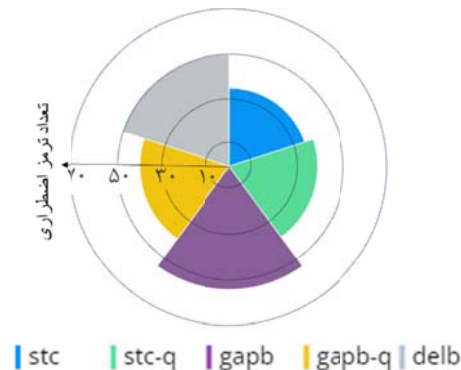
شکل ۷. تأثیر نحوه کنترل تقاطع چراغ‌دار بر الف: طول صف و ب: زمان بودن در صف در تقاطع‌ها به تفکیک سناریوهای کنترل و بر اساس زمان شبیه‌سازی



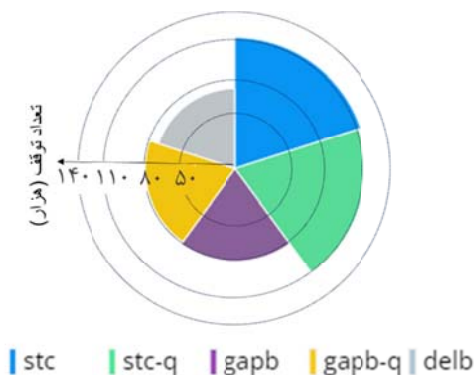
شکل ۸. تأثیر نحوه کنترل تقاطع چراغ‌دار بر تعداد الف: ترمز اضطراری، ب: توقف و ج: برخورد احتمالی در تقاطع‌ها به تفکیک سناریوهای کنترل

تقاطع‌ها از نقاط پرخطر در شبکه محسوب می‌شوند. نرم‌افزار SUMO با توجه به ابزارهایی که دارد، امکان بررسی ایمنی تقاطع‌ها را فراهم می‌کند. در این مطالعه از سه شاخص برای انجام این بررسی و مقایسه سناریوهای کنترل چراغ‌های راهنمایی از لحاظ ایمنی استفاده می‌شود: الف: تعداد توقف‌ها، ب: تعداد ترمزهای اضطراری و ج: تعداد برخوردهای احتمالی خودروها.

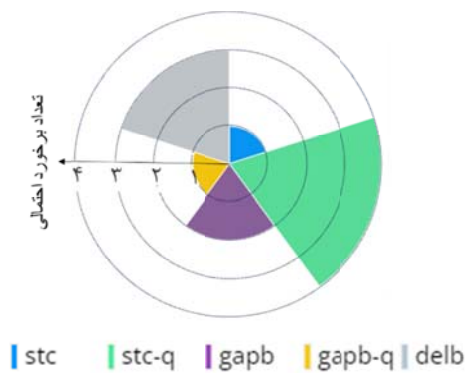
در شکل ۸، قسمت الف، تأثیر سناریوهای کنترل چراغ‌های راهنمایی بر تعداد ترمزهای اضطراری که می‌تواند نشان‌دهنده وجود پتانسیل حادثه باشد، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هوشمندسازی تقاطع‌های چراغ‌دار، می‌تواند تعداد ترمزهای اضطراری را افزایش دهد. این افزایش در سناریو مبتنی بر فاصله بیشترین مقدار خود را دارد که نسبت به سناریو ایستا، تعداد ترمزهای اضطراری با افزایش ۵۷ درصدی همراه است. در همین شکل می‌توان مشاهده کرد که هماهنگ‌سازی تقاطع‌های ایستا، تعداد ترمزهای اضطراری را ۱۱ درصد افزایش می‌دهد. در قسمت ب، تعداد توقف‌ها قابل مشاهده است. هوشمندسازی تقاطع‌ها، تعداد توقف در شبکه را کاهش می‌دهد. سناریو مبتنی بر تأخیر با کاهش ۳۸ درصدی تعداد توقف‌ها نسبت به حالت ایستا، بهترین عملکرد را در بین سناریوهای در نظر گرفته شده دارد. هماهنگ‌سازی چراغ‌های راهنمایی اثر مثبتی بر تعداد توقف دارد؛ به طوری که هماهنگ‌سازی چراغ‌های راهنمایی ایستا نسبت به حالت عادی، تعداد توقف‌ها را ۲ درصد کاهش می‌دهد. تعداد برخوردهای احتمالی (شکل ۸، قسمت ج) نشان‌دهنده موقعیتی است که فاصله دو خودرو در حال حرکت از کمینه فاصله در نظر گرفته شده (۲/۵ متر) کمتر شود. در سناریو ایستا که تقاطع‌های چراغ‌دار دارای فزبندی ثابت هستند، یک احتمال برخورد ثبت شده است. این درحالی که است که در سه سناریو دیگر این تعداد افزایش یافته است. سناریو ایستا هماهنگ شده بدترین حالت را دارد که تعداد برخوردهای احتمالی به ۴ مورد افزایش می‌یابد. در تقاطع‌ها، سرعت کم و ازدحام زیاد است. همین امر باعث شده که تقاطع‌ها کانون اصلی انتشار آلاینده زیست محیطی در شبکه حمل و نقل باشند. یکی از اهداف این مطالعه، بررسی سناریوهای کنترل تقاطع چراغ‌دار، با دیدگاه زیست محیطی است. در شکل ۹ تأثیر این سناریوها بر میزان انتشار آلاینده‌های CO<sub>2</sub> و CO مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج می‌توان گفت که هماهنگ کردن چراغ‌های راهنمایی ایستا، میزان انتشار را کاهش می‌دهد. این میزان در آلاینده‌های CO<sub>2</sub> و CO به ترتیب به حدود ۶ و ۳ درصد می‌رسد. هوشمندسازی تقاطع تأثیر مثبتی بر میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی دارد. در سناریو مبتنی بر فاصله، نسبت به سناریو ایستا، میزان انتشار آلاینده‌های CO<sub>2</sub> و CO به ترتیب ۳۶ و ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. هماهنگ کردن تقاطع‌ها



الف: ترمز اضطراری

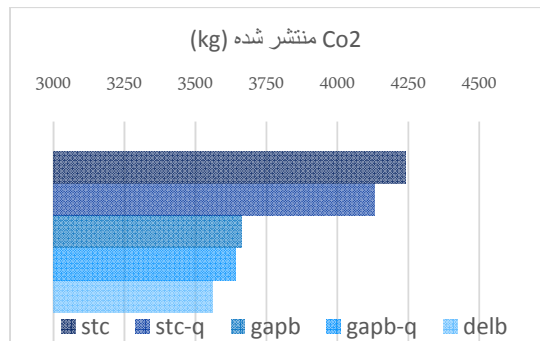


ب: توقف

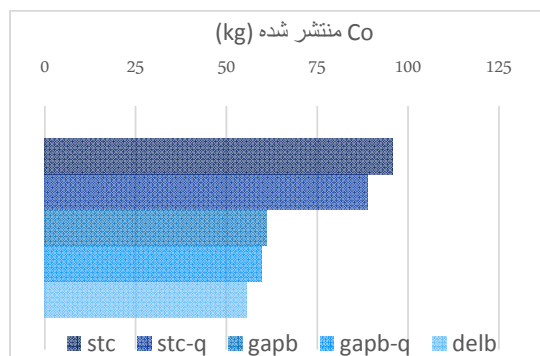


ج: برخورد احتمالی

شکل ۸. تأثیر نحوه کنترل تقاطع چراغ‌دار بر تعداد الف: ترمز اضطراری، ب: توقف و ج: برخورد احتمالی در تقاطع‌ها به تفکیک سناریوهای کنترل

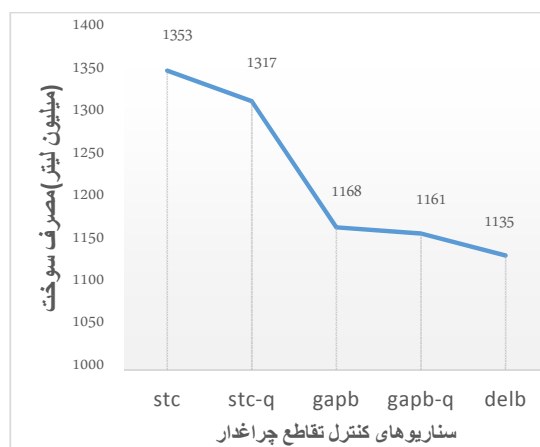


الف: CO<sub>2</sub>



ب: CO

شکل ۹. تأثیر نحوه کنترل تقاطع چراغ‌دار بر میزان انتشار الف: CO<sub>2</sub> و ب: CO و به تفکیک سناریوهای کنترل



شکل ۱۰. تأثیر نحوه کنترل تقاطع چراغ‌دار بر میزان مصرف سوخت

که تقاطع‌های ایستا هماهنگ می‌شوند، میزان مصرف سوخت، نسبت به سناریو ایستا، ۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. در سناریو مبتنی بر فاصله، میزان کاهش مصرف سوخت به حدود ۱۴ درصد می‌رسد. این مقدار در سناریو مبتنی بر فاصله هماهنگ شده پررنگ‌تر است. در سناریو مبتنی بر تأخیر، کاهش میزان مصرف سوخت به ۱۶ درصد می‌رسد که بالاترین مقدار در بین سناریوهای پیشنهادشده را دارد.

در سناریو متنی بر فاصله، میزان کاهش انتشار را پررنگ‌تر می‌کند. با این حال، در سناریو مبتنی بر تأخیر، میزان کاهش انتشار آلاینده منوکسید کربن، ۴۲ درصد و آلاینده دی اکسید کربن، ۱۶ درصد کاهش پیدا می‌کند که بیانگر بیشترین کاهش انتشار در بین سناریوهای پیشنهادشده است. در شکل ۱۰ که تأثیر سناریوهای پیشنهادشده بر میزان مصرف سوخت مشاهده می‌شود، تأثیر هوشمندسازی به وضوح آشکار است. در گام اول

## ۵- نتیجه‌گیری

در یک شبکه حمل‌ونقل، چه از نگاه ایمنی و چه از نگاه زیست‌محیطی، تقاطع‌ها را می‌توان به‌عنوان نقاط بحرانی نام برد. در این مطالعه، ۱۸۰۰۰ سفر بصورت تعادل کاربر پویا به شبکه محدوده کنترل آلودگی هوای شهر تهران تخصیص داده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن ۵ سناریو برای کنترل تقاطع‌های چراغ‌دار، شامل دو رویکرد هوشمند مبتنی بر فاصله و مبتنی بر تأخیر، عملکرد تقاطع‌های چراغ‌دار این محدوده، با نگاه ایمنی، زیست محیطی و ترافیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که:

-هماهنگ کردن و هوشمندسازی تقاطع‌های چراغ‌دار، پارامترهای زمانی شبکه از جمله زمان سفر، زمان انتظار و زمان از دست‌رفته در شبکه را به ترتیب تا ۱۸، ۶۶ و ۴۸ درصد بهبود می‌بخشد.

-یکی از راه‌کارهای موجود برای کاهش طول صف و زمان بودن در صف در تقاطع‌های چراغ‌دار، هوشمندسازی و هماهنگ کردن این تقاطع است که میزان این پارامترها را تا ۶۸ و ۶۴ درصد کاهش می‌دهد.

-هوشمندسازی و هماهنگ کردن تقاطع‌ها به دلیل تمرکز بر بهینه کردن عملکرد بر مبنای پارامترهای زمانی و به تبع آن پارامترهای زیست‌محیطی، این امکان را به وجود می‌آورد که سطح عملکرد شبکه از لحاظ ایمنی کاهش یابد. در سناریوهایی که تقاطع چراغ‌دار بصورت هوشمند کنترل می‌شوند، هرچند

تعداد کل توقف‌ها تا ۳۸ درصد با کاهش همراه است، اما میزان ترمزهای اضطراری تا حدود ۵۷ درصد افزایش و تعداد تصادفات ۴ برابر می‌شود.

- یکی از پیامدهای کاهش زمان سفر و طول صف که به‌موجب هوشمندسازی و هماهنگ کردن تقاطع ایجاد می‌شود، کاهش میزان انتشار و میزان مصرف سوخت است. هوشمندسازی تقاطع‌ها، میزان انتشار منوکسید کربن و دی اکسید کربن را به ترتیب تا حدود ۴۲ و ۱۶ درصد و میزان مصرف سوخت را تا حدود ۱۶ درصد کاهش می‌دهد.

-هرچند هماهنگ کردن تقاطع‌ها نسبت به حالت ایستا، عملکرد آن‌ها را بهبود می‌دهد، اما سناریو مبتنی بر تأخیر در بیشتر پارامترهای در نظر گرفته‌شده، به نسبت عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

هرچند در این مطالعه دو رویکرد هوشمندسازی که قابل اجرا توسط گردانندگان سیستم است، بررسی می‌شود، اما می‌توان شیوه‌های کنترلی دیگر، با نگاهی متفاوت، بررسی و تاثیرشان بر شبکه تحلیل شود. انتظار می‌رود تکنولوژی‌های نوین که شیوه‌سفرهای جدیدی را خلق کرده‌اند، مانند خودروهای خودران، بدلیل وجود پتانسیل، برای ایجاد ارتباط بین خودروها و زیرساخت و تبادل اطلاعات، رویکردهای کنونی کنترل تقاطع را دگرگون سازند که بررسی این موضوع، می‌تواند محور مطالعات آتی باشد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Ohio
2. Equivalent-flow analysis
3. Jining
4. Vehicular ad hoc networks (VANETs)
5. Canny

6. Reinforcement Learning (RL)
7. Deep actor-critic
8. Smart traffic light
9. Microscopic
10. Macroscopic
11. Mesoscopic
12. Simulation of Urban Mobility (SUMO)
13. Multi-modal
14. Static
15. Gap-based
16. Induction loop detectors
17. Delay-based
18. Detector Range
19. Time loss
20. Kruss
21. Gawron
22. Logit

#### ۷. مراجع

-Goel, A., and Kumar, P. (2014). A review of fundamental drivers governing the emissions, dispersion and exposure to vehicle-emitted nanoparticles at signalised traffic intersections. *Atmospheric Environment*, 97, 316–331. [doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2014.08.037](https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2014.08.037)

-Hennessy, D. A., and Wiesenthal, D. L. (1999). Traffic congestion, driver stress, and driver aggression. *Aggressive Behavior: Official Journal of the International Society for Research on Aggression*, 25(6), 409–423.

-Hoogendoorn, S. P., and Hoogendoorn, R. (2010). Generic calibration framework for joint estimation of car-following models by using microscopic data. *Transportation Research Record*, 2188, 37–45. [doi.org/10.3141/2188-05](https://doi.org/10.3141/2188-05)

-Jiang, C. Y., Hu, X. M., and Chen, W. N. (2021). An Urban Traffic Signal Control System Based on Traffic Flow Prediction. *2021 13th International Conference on Advanced Computational Intelligence, ICACI 2021*, 259–265. [doi.org/10.1109/ICACI52617.2021.9435905](https://doi.org/10.1109/ICACI52617.2021.9435905)

-Keyvan-Ekbatani, M., Carlson, R. C., Knoop, V. L., and Papageorgiou, M. (2021). Optimizing distribution of metered traffic flow in perimeter control: Queue and delay balancing approaches. *Control Engineering Practice*, 110, 104762. [doi.org/10.1016/J.CONENGPRACT.2021.104762](https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRACT.2021.104762)

-Krajzewicz, Daniel, Georg Hertkorn, C. Rössel, and P. Wagner (2002). SUMO

-Al Mallah, R., Quintero, A., and Farooq, B. (2017). Distributed Classification of Urban Congestion Using VANET. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(9), 2435–2442. [doi.org/10.1109/TITS.2016.2641903](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2641903)

-Arifin, A. S., and Zulkifli, F. Y. (2021). Recent development of smart traffic lights. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 10(1), 224. [doi.org/10.11591/ijai.v10.i1.pp224-233](https://doi.org/10.11591/ijai.v10.i1.pp224-233)

-Banu, A. S. M., Lakchida, S. A. S., Shanthini, V. S., and Stinsha, S. L. (2022). Smart Traffic Light Control System Using Image Processing. *Proceedings - International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems, ICAISS 2022*, 700–706. [doi.org/10.1109/ICAISS55157.2022.10010764](https://doi.org/10.1109/ICAISS55157.2022.10010764)

-Barhmaiah, B., Chandrasekar, A., Ramya, T., and Moses Santhakumar, S. (2022). Delay models for Signalised Intersections with Vehicle Actuated Controlled system in Heterogeneous Traffic Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084(1), 012038. [doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012038](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012038)

-Erdmann, J. (2015). SUMO's Lane-Changing Model. *Lecture Notes in Mobility*, 105–123. [doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6_7)

-Gawron, C. (2011). An Iterative Algorithm to Determine the Dynamic User Equilibrium in a Traffic Simulation Model. 9(3), 393–407. [doi.org/10.1142/S0129183198000303](https://doi.org/10.1142/S0129183198000303)

**doi.org/10.11113/JT.V70.3481**

-Song, J., Wu, Y., Xu, Z., and Lin, X. (2015). Research on car-following model based on SUMO. *Proceedings of 2014 IEEE 7th International Conference on Advanced Infocomm Technology, IEEE/ICAIT 2014*, 47–55.

**doi.org/10.1109/ICAIT.2014.7019528**

-Song, M., Yin, M., Chen, X. (Michael), Zhang, L., and Li, M. (2013). A Simulation-based Approach for Sustainable Transportation Systems Evaluation and Optimization: Theory, Systematic Framework and Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(Cictp), 2274–2286.

**doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.257**

-Stephens, A. N., Beanland, V., Candappa, N., Mitsopoulos-Rubens, E., Corben, B., and Lenné, M. G. (2017). A driving simulator evaluation of potential speed reductions using two innovative designs for signalised urban intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 98, 25–36.

**doi.org/10.1016/J.AAP.2016.09.022**

-World's Most Polluted Countries in 2022 - PM2.5 Ranking | IQAir. (n.d.). Retrieved February 15, 2024, from <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>

-Zerroug, R., Zerroug, R., Aliouat, Z., Aliouat, M., and Alti, A. (2023). *Smart Cities Traffic Light Management Systems Review: Models and Approaches*.

**doi.org/10.21203/RS.3.RS-3257486/V1**

-Zhou, B., Ma, D., Song, X., and Dai, H. (2022). A Deep Reinforcement Learning Approach to Traffic Signal Control with Temporal Traffic Pattern Mining. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 11789–11800.

**doi.org/10.1109/TITS.2021.3107258**

(Simulation of Urban Mobility) - an Open-Source Traffic Simulation.

-Krauss, S. (1998). *Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics*.

-Kuang, L., Zheng, J., Li, K., and Gao, H. (2021). Intelligent Traffic Signal Control Based on Reinforcement Learning with State Reduction for Smart Cities. *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, 21(4). **doi.org/10.1145/3418682**

-Li, R., Zheng, C., Wang, H., Zhao, D., Ran, B., and Xue, X. (2020). Intersection traffic signal optimisation considering the impact of upstream curbside bus stops. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(8), 880–888.

**doi.org/10.1049/IET-ITS.2019.0660**

-Lochrane, T. (2014). *a New Multidimensional Psycho-Physical Framework for Modeling Car-Following in a Freeway Work Zone*. 2004–2019.

-Lücken, L., Mintsis, E., Porfyri, K. N., Alms, R., Flötteröd, Y. P., and Koutras, D. (2019). From automated to manual-modeling control transitions with sumo. *EPiC Series in Computing*, 62, 124–144.

**doi.org/10.29007/sfgk**

-Mortazavi Azad, S. M., and Ramazani, A. (2023). Smart control of traffic lights based on traffic density in the multi-intersection network by using Q learning. *Discover Artificial Intelligence 2023 3:1*, 3(1), 1–11.

**doi.org/10.1007/S44163-023-00087-Z**

-Ostrowski, K., and Budzynski, M. (2019). Modelling Signalised Intersections Reliability of Functioning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(6), 062028.

**doi.org/10.1088/1757-899X/471/6/062028**

-Shahid, S., Minhans, A., and Puan, O. C. (2014). Assessment of Greenhouse Gas Emission Reduction Measures in Transportation Sector of Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 70(4), 1–8.

# Performance Evaluation of Signalized Intersections with an Intelligent Control Approach - A Case Study in the Pollution Control Zone of Tehran

*Ali Rahmani, M.Sc., Grad., Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Amir Reza Mamdoohi, Associate Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran;  
and Adjunct Professor, Department of Civil, Geological & Mining Eng., Polytechnique Montréal, Canada.*

*E-mail: armamdoohi@modares.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

With the increase in population in urban and rural areas, transportation systems require less efficient management to meet growing demands. Space and resource constraints for infrastructure improvements lead to issues that impact urban life. The increase in demand for mobility can affect environmental, traffic, and safety parameters. Intersections can be mentioned as main centers of congestion, delay, pollutant emissions, and safety hazards. This situation presents a fundamental challenge for improving and optimally controlling traffic within the current infrastructure framework. In this study, the existing demand is first assigned dynamically using the Gawron Path Selection Algorithm over 5 iterations. Then, the performance of 5 scenarios for controlling signalized intersections, including two intelligent approaches based on time spacing and delay, is investigated using microsimulation within the pollution control framework in terms of safety, environmental, and traffic concerns in Tehran. The results show that smart signalized intersection control can reduce queue length by up to 64% and fuel consumption by around 16%. The results of this study can assist transportation system operators in decision-making regarding intersection intelligence optimization.

**Keywords:** Lighted Intersection, Intelligent Intersection, Microscopic Simulation, Coordinated Traffic Light, Intelligent Traffic Light