

تعیین ظرفیت گردش به چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان ترافیک

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

امیر مسعود رحیمی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، ایران

زهره قاسمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۲۴-۱۳

چکیده

عملکرد چراغ‌های راهنمایی در فازبندی مناسب ضمن کاهش تأخیر، باید سطح بالایی از ایمنی را نیز تامین نماید. در تقاطع‌های چراغ‌دار حرکت گردش به چپ، زمان‌برترین و پیچیده‌ترین حرکت است که می‌تواند به صورت «محافظة شده»، «محافظة نشده» و ترکیبی از «محافظة شده- محافظت نشده» برنامه‌ریزی شود. جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای تعداد قابل توجه متغیرهای محاسبه ظرفیت حرکت گردش به چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار به روش کتاب راهنمای ظرفیت راه‌ها (HCM) زمان‌بر و برای تصمیم‌گیری‌های سریع امکان‌پذیر نیست. لذا شناسایی متغیرها موثرتر و دستیابی به روشی سریع در این خصوص، مسئله پژوهش است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی حجم عبوری حرکت گردش به چپ و ارائه‌ی یک رابطه‌ی ساده با تعداد متغیرهای کمتر نسبت به روش HCM برای محاسبه‌ی حجم گردش به چپ و تشخیص فازبندی این حرکت است. در این مطالعه از اطلاعات دو تقاطع چراغ‌دار شهر اصفهان استفاده شده است. نتیجه حاصل از ساخت مدل‌های مختلف و آزمون‌های آماری منجر به ارائه «یک مدل لگاریتمی تک متغیره ساده برای تعیین حجم عبوری گردش به چپ» بر پایه‌ی «حجم جریان مخالف، تعداد خطوط جریان مخالف و درصد زمان سبز» شده است. این مدل مقادیر بحرانی حجم عبوری را در صورت نیاز به فاز گردش به چپ محافظت‌شده مشخص می‌کند. مدل بر پایه‌ی مشاهدات صورت گرفته از دنیای واقعی ایجاد شده و اعتبار سنجی مدل بر پایه‌ی روش HCM انجام شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی تشابه زیادی با مقادیر مشاهده شده دارد. در پایان تقاطع‌های مورد نظر از طریق نرم‌افزار شبیه‌ساز AIMSUN مدل‌سازی شده و حجم بحرانی حرکت گردش به چپ در حالت فاز محافظت‌شده براساس شاخص‌ها به دست آمده است

واژه‌های کلیدی: تقاطع‌های چراغ‌دار، شبیه‌سازی جریان ترافیک، ظرفیت گردش به چپ، فاز محافظت‌شده، فاز محافظت نشده

۱- مقدمه

جدید، با وجود آنکه می‌تواند به حل این معضل از طرق مختلف کمک نماید، لکن به علت فقدان فضای فیزیکی کافی، کارآمدی مناسبی نخواهد داشت. در همین راستا برای افزایش ظرفیت شبکه

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و وسایل نقلیه، در چند دهه‌ی اخیر شهروندان شاهد ازدحام ترافیک و اختلال در آمدو شد وسایل نقلیه هستند. احداث خیابان‌ها، بزرگراه‌ها و آزادراه‌های

- ۱- متغیرهای تأثیرگذار بر روی حجم حرکت گردش‌به‌چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار کدام است؟
- ۲- بهترین مدل برای محاسبه حجم عبوری حرکت گردش‌به‌چپ کدام است؟
- ۳- سناریو بحرانی برای حجم عبوری حرکت گردش‌به‌چپ در تقاطع‌ها کدام است؟

۲- پیشینه تحقیق

حرکت گردش‌به‌چپ در تقاطع‌ها با برخوردهای مختلفی روبه‌رو است. خودروهای گردش‌به‌چپ تنها عامل اصلی ایجاد درگیری نمی‌باشند اما بر روی جریان ترافیک مقابل تأثیر گذاشته و باعث افزایش تأخیر و تصادفات در تقاطع‌ها شده و زمان‌بندی چراغ ترافیکی را پیچیده می‌کنند. این موارد در تقاطع‌های اصلی شهر (جایی که حجم چپ‌گردها زیاد است) تشدید می‌یابند (Yanxi and Xiaoguang, 2013). حرکت‌های گردش‌به‌چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار معمولاً به ۳ صورت کنترل می‌گردند: محافظت‌شده، محافظت نشده و ترکیبی از محافظت‌شده و محافظت نشده. بر طبق کتابچه‌ی راهنمای وسایل کنترل تجهیزات ترافیک در آمریکا (MUTCD) نوع محافظت نشده، فاز اضافی برای ترافیک گردش‌به‌چپ ایجاد نمی‌کند و خودروهای گردش‌به‌چپ حرکت گردش‌به‌چپ خود را در فاز سبز، بعد از عبور عابران و ترافیک مسیر مقابل انجام می‌دهند. حرکت گردش‌به‌چپ محافظت نشده می‌تواند در زمان‌های غیر اوج ایمنی ترافیکی تقاطع را حفظ نماید اما ممکن است در ساعت‌های اوج با مشکل ایمنی روبرو گردد. نوع محافظت‌شده‌ی آن یک‌فاز اضافی برای حرکت گردش‌به‌چپ ایجاد کرده و تنها زمانی به خودروها اجازه‌ی عبور می‌دهد که چراغ سبز برای این حرکت به نمایش درآید. نوع محافظت‌شده - محافظت نشده‌ی آن ترکیبی از این دو فاز است (Chen, and Eving, 2015). در سال ۱۹۷۹ ایجت^۳ اولین تلاش‌ها را برای شناسایی فاز گردش‌به‌چپ انجام داد. او مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها را با مطالعه بر روی تقاطع‌هایی با خط گردش‌به‌چپ در ایالت کنتاکی با مدنظر قرار دادن سابقه‌ی تصادفات، تأخیر، حجم و درگیری‌های ترافیکی، پیشنهاد داد (Agent, 1979). دستورالعمل‌های جدیدتر بر پایه-ی مطالعات صورت گرفته از ۵۸ تقاطع کنتاکی که دارای فاز

ارتباطی می‌توان تقاطع‌های موجود را از نظر عملکرد بهینه‌سازی نمود. گرچه فقط بخش کوچکی از شبکه معابر شهری به تقاطع‌ها اختصاص دارد ولی این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا عملکرد شبکه خیابانی شهری متأثر از ظرفیت تقاطع‌های آن است. استفاده از روش‌های صحیح هدایت و کنترل ترافیک تقاطع موجب افزایش ظرفیت و بهبود کارایی شبکه می‌شود. هدف از تحلیل عملکرد تقاطع، تعیین ظرفیت آن تحت شرایط هندسی، ترافیکی و کنترلی موجود و با حفظ سطح خدمت معین است. با توجه به شرایط خاص تردد حاکم در تقاطع‌های کشور ما، کاربرد ضوابط تحلیل ظرفیت و سطح خدمت تقاطع‌های سایر کشورها لزوماً نتایج مطلوبی به همراه نخواهد داشت.

عامل مهمی که می‌تواند در ایجاد ترافیک و تأخیر در تقاطع‌ها تأثیرگذار باشد حرکت «گردش‌به‌چپ» است. در تقاطع‌های چراغ‌دار، حرکت گردش‌به‌چپ مشکل‌ترین، زمان‌برترین و پیچیده‌ترین حرکتی است که صورت می‌گیرد. روش‌های مختلفی برای بهبود کارایی عملکردی تقاطع‌های چراغ‌دار با تقاضای گردش‌به‌چپ بالا ارائه گردیده است. قابلیت‌هایی که تقاطع‌های چراغ‌دار (مجهز به کنترل‌گرهای هوشمند) به همراه دارند این امکان را برای مهندسان ایجاد می‌نماید که نقش ظرفیت گردش‌به‌چپ به‌صورت مناسبی در فرایند فازبندی و زمان‌بندی تقاطع‌ها لحاظ گردد. از این‌رو مطالعه و تحقیق بر روی نحوه‌ی تعیین نوع فاز و شیوه کنترل این چراغ‌ها می‌تواند گام مهمی جهت جلوگیری از به وجود آمدن ازدحام، پس‌زدگی صف و وقوع تصادفات باشد.

هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر تعیین متغیرهای تأثیرگذار بر حرکت گردش‌به‌چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار و توانایی پیش‌بینی ارتباط این متغیرها با انتخاب فاز گردش‌به‌چپ با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی و مدل‌های شبیه‌سازی است؛ همچنین ارائه‌ی مدلی ساده که توانایی پیش‌بینی حجم حرکت گردش‌به‌چپ را با تعداد متغیرهای کمتر نسبت به راهنمای ظرفیت راه‌ها^۱ (HCM) دارا باشد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش سه پرسش کلیدی مطرح گردیده و پاسخ به آن‌ها، محتوای پژوهش جاری را شکل می‌دهد.

گردش به چپ نیازمند فاز محافظت شده است) و سرعت رویکرد که اگر بیشتر از ۷۲/۴ کیلومتر بر ساعت باشد نیز نیازمند فاز محافظت شده است. در حالی که هر کشوری دستورالعمل‌های خودش را ایجاد کرده است اما نتیجتاً همه‌ی آن‌ها بر پایه‌ی تحقیقات صورت گرفته‌ی اولیه‌ای است که در بالا به آن اشاره شد. بیشتر دستورالعمل‌ها برای فاز محافظت شده بر پایه‌ی حجم عبوری ترافیک گردش به چپ و حرکت‌های مستقیم مقابل است (Agent, Stamatiadis and Dye, 1995) به‌طور کلی دستورالعمل‌ها برای نصب فاز گردش به چپ محافظت شده شامل در نظر گرفتن ۳ معیار کلیدی است: حجم، تأخیر و سابقه‌ی تصادفات. در ادامه متداول‌ترین انواع ضوابط با در نظر گرفتن هریک از معیارها ذکر شده است:

الف) حجم: دو معیار متداول حجم در بررسی‌های جاری استفاده شد؛ مقدار مطلق حجم گردش به چپ (حجم عبوری گردش به چپ) و حجم رویکرد مخالف. قبل از نصب فاز گردش به چپ محافظت شده توانایی یک تقاطع برای تخلیه‌ی حرکت گردش به چپ در یک رویکرد مشخص بر پایه‌ی پذیرش فاصله^۵ است و این موضوع روی مانورهای گردش به چپ محافظت نشده تأثیر می‌گذارد. تا زمانی که معیارهای حجم گردش به چپ برای این فاکتور عملکرد گردش به چپ محافظت نشده محاسبه نشده است، از حجم عبوری استفاده می‌گردد. اولین معیار یک فاز گردش به چپ محافظت شده، زمانی است که حجم گردش به چپ از آستانه‌ی مقادیر مشخص ترافیک و حرکت‌های عابران پیاده روی رویکردهای وابسته تجاوز می‌کند. معیار دوم حجم عبوری مطابق رابطه زیر است:

$$X \times Y \geq \text{constant} \quad (1)$$

زمانی که:

$$X = \text{حجم گردش به چپ}$$

$$Y = \text{حجم مستقیم مخالف}$$

بر پایه‌ی تئوری‌های پذیرفته‌شده‌ی پروسه‌ی پذیرش فاصله، به نظر نمی‌رسد که این فرم ساده پیچیدگی‌های پذیرش فاصله را در برگیرد. لین و ماکیمهل^۶ در سال ۱۹۸۳ اظهار داشتند که پذیرش این موضوع که بتوان عملکرد پیچیده‌ی گردش به چپ را

محافظت شده/محافظت نشده بودند به دست آمد. طبق نتایج بدست آمده در صورتی که هیچ‌یک از شرایط زیر در تقاطع برقرار نباشد می‌توان از فاز محافظت شده/محافظت نشده برای کاهش تأخیر تقاطع استفاده کرد:

- محدوده‌ی سرعت بیشتر از ۷۲/۴ کیلومتر بر ساعت باشد.
 - فاز محافظت شده وجود داشته باشد و محدوده‌ی سرعت بیشتر از ۵۶/۳ کیلومتر بر ساعت باشد.
 - تعداد خطوط رویکرد مستقیم مقابل ۳ خط یا بیشتر باشد.
 - به علت هندسه‌ی تقاطع، خط گردش به چپ دارای یک چراغ مجزا باشد.
 - دو خط گردش به چپ وجود داشته باشد.
 - پتانسیل تصادفات گردش به چپ وجود داشته باشد.
 - فاصله‌ی دید موجود کمتر از فاصله‌ی دید لازم بر پایه‌ی محدوده‌ی سرعت و یا سرعت عملکردی، زمان عکس‌العمل ۱/۵ ثانیه‌ای و ضریب اصطکاک ۰/۲ باشد (Agent, 1985).
- کاترل^۴ نیز در سال ۱۹۸۵ مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها را ارائه داد یافته‌های او نیز شباهت زیادی با پیشنهادهای ایجنت در سال ۱۹۸۵ داشت، او نیاز به قضاوت مهندسی را به‌عنوان قسمتی از پروسه مورد تأکید قرارداد (Cottrell, 1985).

ایجنت در سال ۱۹۹۵ مطالعات جدیدی انجام داد، طبق یافته‌های این مطالعه، می‌توان در یک تقاطع از یک فاز محافظت شده/محافظت نشده استفاده کرد مگر اینکه ترکیبی از فاکتورهای خاص نشان دهد که مشکل گردش به چپ و یا پتانسیل تصادفات گردش به چپ وجود دارد. فاکتورهای در نظر گرفته‌شده شامل تاریخچه‌ی تصادفات (۴ یا بیشتر از ۴ تصادف در یک سال، ۶ تصادف در دو سال و یا ۸ تصادف در سه سال)، حجم ترافیک عبوری (بیشتر از ۳۰۰,۰۰۰ وسیله نقلیه برای مسیر ۴ خطه و یا ۱۵۰,۰۰۰ وسیله نقلیه برای مسیر دوخطه در سال)، تأخیر (بیشتر از ۲ خودرو بر ساعت برای یک رویکرد در طول ساعت اوج)، تعداد خطوط گردش به چپ (بیشتر از یک خط گردش به چپ نیازمند فاز محافظت شده است)، تعداد خطوط مخالف (بیشتر از ۲ خط مخالف نیازمند فاز محافظت شده است)، فاصله‌ی دید (بر اساس دستورالعمل‌های اشتو)، حجم گردش به چپ (۳۰۰ خودرو در ساعت نیازمند فاز محافظت شده است)، حجم رویکرد مقابل (۷۵۰ خودرو برای یک خط و ۱۵۰۰ خودرو برای دو خط، حجم

(2016). بر اساس مطالعات لوینسون^۶ تعداد وسیله نقلیه‌های عبوری که دچار تأخیر شده و یا حرکت آن‌ها با مانع مواجه شده است به تعداد وسیله نقلیه‌های چپ‌گرد کننده و موقعیت‌های آن‌ها در تقاطع چراغ‌دار، بستگی دارد (Levinson, 1989).

طبق تحقیقات کراس و ماهالال^۷ زمانی که یک وسیله نقلیه چپ‌گرد در هر سیکل وجود دارد تقریباً ۴۰٪ وسیله نقلیه‌های عبوری مستقیم در خط مشترک بلوکه می‌شوند. به همین ترتیب زمانی که تعداد ۳ وسیله نقلیه گردش‌به‌چپ در هر سیکل وجود داشته باشد تعداد ۷۰٪ وسایل نقلیه‌ی عبوری مستقیم بلوکه می‌شوند. همچنین پژوهش مذکور ثابت می‌کند که اگر خط چپ‌گرد مجزا طراحی شود درصد وسایل نقلیه متوقف‌شده و یا کاهش سرعت‌دهنده به مراتب کاهش می‌یابد (Craus and Mahalel, 1986).

ظرفیت در تقاطع‌های چراغ‌دار حداکثر جریان وسایل نقلیه گذرنده از تقاطع تحت شرایط موجود ترافیکی، هندسی و زمان‌بندی چراغ تعریف می‌شود (Transportation Research Board, 2010).

پارامتر ظرفیت در تقاطع‌های چراغ‌دار پارامتری اساسی در شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری است. اگر بتوان ظرفیت را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرد می‌توان تأخیر یا طول صف در تقاطع‌های چراغ‌دار و در نتیجه عملکرد ترافیک و کیفیت سطح سرویس را محاسبه کرد. متأسفانه در شرایط ترافیکی دنیای واقعی ظرفیت را نمی‌توان به‌طور مستقیم برای تقاطع‌های موجود بخصوص در شرایط غیراشباع که میزان تقاضا کمتر از ظرفیت تقاطع است اندازه‌گیری کرد (Dion, Rakha and Knag, 2004).

زمانی که حرکت گردش‌به‌چپ در تقاطع به‌صورت محافظت نشده انجام می‌گیرد از رابطه‌ی (۲) برای محاسبه‌ی ظرفیت استفاده می‌گردد: (Transportation Research Board, 2010)

$$C_{SL} = \frac{g_p \times S_{sl} + 3600 \times (1 + P_L)}{C} \quad (2)$$

که در این رابطه متغیرهای موردنظر به شرح ذیل می‌باشند:

C_{SL} : ظرفیت خط مشترک با عملکرد گردش‌به‌چپ محافظت نشده (veh/h).

S_{sl} : نرخ جریان اشباع در خط مشترک گردش‌به‌چپ و حرکت مستقیم با عملکرد محافظت نشده (veh/h/ln).

به‌وسیله‌ی این مقادیر عددی با دقت قابل قبول بخصوص برای محدوده‌ی شرایط ترافیکی وسیع مشخص کرد، دشوار است.

(ب) تأخیر: تقریباً تمامی قوانین راهنمایی و رانندگی که در این حوزه قرار می‌گیرند، ایجاد یک‌فاز گردش‌به‌چپ انحصاری را بر اساس برخی از دلایل مانند متوسط تأخیری که گردش‌به‌چپ‌ها هنگام اجرای فاز محافظت نشده متحمل شده‌اند توجیه می‌کنند. هیچ‌یک از این قوانین، برای ترافیک تقاطع جامع نیستند و چگونگی متوسط تأخیر متحمل شده به گردش‌به‌چپ‌ها و یا سایر تأخیرهای مربوط به دیگر حرکت‌ها از قبیل مستقیم رو و یا مسیرهای مخالف را با یکدیگر مقایسه نمی‌کنند.

(ج) تاریخچه تصادفات: ملاحظات ایمنی از مهم‌ترین ضوابط برای نصب فاز گردش‌به‌چپ محافظت‌شده و در برخی موارد به‌منظور حذف فاز محافظت نشده بوده است. این ضوابط تعدادی مقادیر اولیه را در ارتباط با تصادفات ترافیکی در رویکردی خاص یا رویکردهای مخالف در طول دوره‌ی یک یا دو ساله برای گردش‌به‌چپ مشخص کرده است. ضوابط دیگری که به‌عنوان راهنما برای نصب فاز گردش‌به‌چپ محافظت‌شده استفاده می‌شوند شامل ظرفیت گردش‌به‌چپ، ویژگی‌های هندسی تقاطع (تعداد خطوط مقابل و حضور خطوط گردش‌به‌چپ انحصاری) و ویژگی‌های عملکردی (محدوده سرعت و فاصله دید) است. فقدان ضوابط واحد در اجرا و تنوع زیاد ضوابط استفاده‌شده در حوزه‌های مختلف بدیهی است.

در مطالعات قبل بر این باورند که فاز گردش‌به‌چپ محافظت‌شده یک گزینه‌ی ایمن‌تری در مقایسه با فاز گردش‌به‌چپ محافظت نشده است. اشاره شده است که استفاده از تاریخچه‌ی تصادفات گردش‌به‌چپ امری زمان‌بر است و یافتن راهی برای ارزیابی عملکردی ایمنی هر نقطه که بتوان با استفاده از آن روش‌های جایگزینی در پیش‌بینی عملکرد ایمنی تقاطع استفاده شود، دشوار است. شبیه‌سازی می‌تواند سطحی برای تخمین درگیری‌ها از سناریوهای مختلف تأمین کند اما همه با این رویکرد موافق نیستند. دلیل معمول برای این باور این است که ذات رویکرد مدل‌های شبیه‌سازی بر اساس قوانین پایه‌ی پیشگیری از تصادفات است؛ اما اعتماد به پارامترهای ورودی و تأثیر آن روی دقت و ارتباط عملکرد ایمنی با تاریخچه‌ی تصادفات قابل اثبات است (Stamatiadis, Tate and Kirk, 2010).

P_L : نسبت خودروهای گردش به چپ در خط مشترک.
 C : طول کل سیکل (S).

شکل (۱) ظرفیت تقاطع را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد که به نرخ جریان اشباع و زمان سبز مؤثر محدود شده است. در این نمودار سطح هاشور خورده زیر نمودار معرف حجم وسایل نقلیه عبوری است (Koonce, 2008).

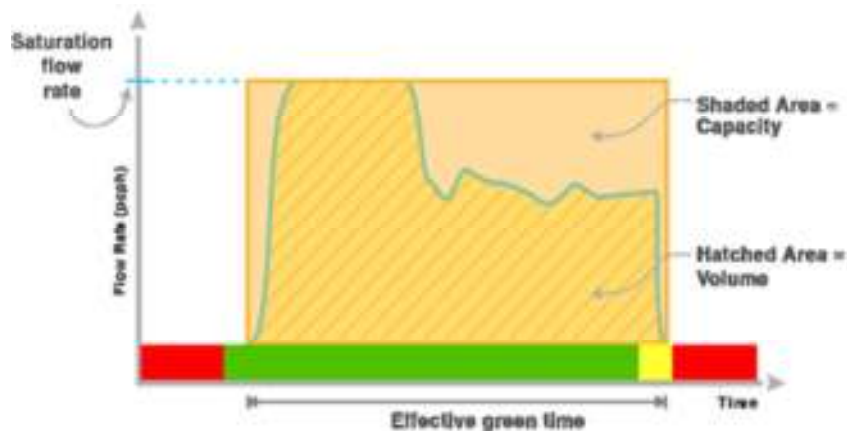
۳- جمع‌آوری اطلاعات

تقاطع‌های انتخاب شده در این مطالعه تقاطع‌های ۴ شاخه‌ای است که رویکردهای آن به صورت عمود بر هم طراحی شده‌اند است. همچنین رویکردها باید دوخطه و یا بیشتر باشند و کلیه‌ی حرکت‌های دوطرفه در آن‌ها وجود داشته و فازبندی چراغ به صورت محافظت نشده برنامه‌ریزی شده باشد. با توجه به این معیارها و بررسی میدانی تقاطع‌های مختلف نهایتاً تقاطع‌های پلیس و ابوذر شهر اصفهان انتخاب شدند.

در مجموع اطلاعات ۴ روز از تقاطع‌های انتخاب شده، مورد بررسی قرار گرفت؛ بخشی از این اطلاعات، داده‌های اسکتس و بخش دیگر به صورت فیلم و برداشت میدانی

جمع‌آوری شده است. اطلاعات توسط برنامه‌ی صفحات گسترده سازمان‌دهی شده و موارد مورد نیاز استخراج شد؛ این موارد شامل: حجم ترافیک چپ‌گرد، حجم مستقیم‌رو رویکرد مقابل، حجم ترافیک راست‌گرد، طول کل سیکل، درصد زمان سبز و تعداد خطوط رویکرد مقابل می‌باشند. از راهنمای ظرفیت راه‌ها برای اعتبار سنجی ظرفیت به دست آمده از این مطالعه استفاده شده است. متغیرهایی که بر روی حجم عبوری حرکت گردش به چپ تأثیرگذار بوده و هم‌زمان توانایی پیش‌بینی برنامه‌ی فازبندی حرکت گردش به چپ را دارا بوده‌اند با استفاده از مدل‌های آماری تعیین شده‌اند. تمامی متغیرها و محدوده‌شان در جدول (۱) آورده شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شده و مدل‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته است.

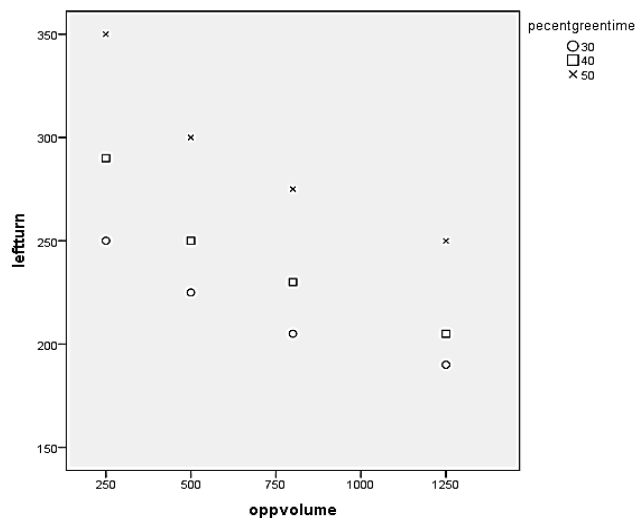
در ادامه تقاطع‌های مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز AIMSUN، شبیه‌سازی شده تا حالت بحرانی تقاطع‌ها را شناسایی و در صورت لزوم ایجاد فاز محافظت شده آن را اجرا نمایند.



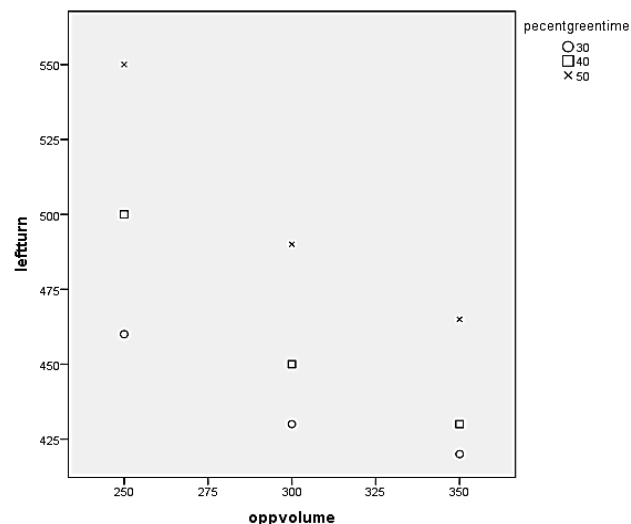
شکل ۱. تصویرسازی حجم و ظرفیت یک حرکت از تقاطع چراغ‌دار (Dion, Rakha and Knag, 2004)

جدول ۱. محدوده‌ی تغییرات متغیرها

متغیرها				عناصر
طول سیکل (sec)	درصد زمان سبز	حجم ترافیک رویکرد مقابل (veh/hr)	تعداد خطوط رویکرد مقابل	
۶۰ - ۱۴۰	۳۰ - ۷۰	۲۵۰ - ۱۲۵۰	۱ - ۳	محدوده



(ب) رویکرد سه خطه



(الف) رویکرد یک خطه

شکل ۲. حجم گردش به چپ در مقابل حجم رویکرد مقابل

حجم رویکرد مقابل با افزایش تعداد خطوط افزایش می‌یابد به این معنا که از رویکرد ۱ خطه حدود ۳۵۰ خودرو در ساعت عبور می‌کند در حالی که در رویکرد ۳ خطه، این تعداد به ۵۵۰ می‌رسد و این افزایش باعث می‌شود که خودروهای گردش به چپ کننده برای انجام حرکت خود مجبور به پذیرش فاصله بیشتر شده و این موضوع کاهش حجم عبوری خودروهای گردش کننده به چپ را نتیجه می‌دهد. به هر حال این تغییرات حجم خطی نیست و بررسی‌ها نشان می‌دهد که نرخ تغییرات حجم گردش به چپ آهسته‌تر از نرخ تغییرات حجم رویکرد مقابل است.

۴-۱- مدل‌سازی

قدم بعدی ایجاد یک مدل رگرسیون خطی چندگانه است تا اهمیت هر متغیر را در پیش‌بینی حجم عبوری حرکت گردش به چپ مشخص نماید. نتایج این تحلیل در جدول (۲)

۴- فرایند مدل‌سازی و یافته‌ها

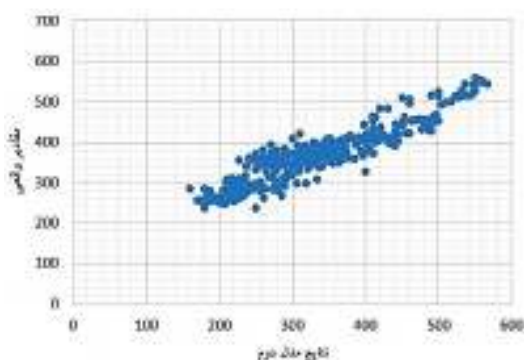
یکی از اهداف این مطالعه تعیین متغیرهایی که بر روی حجم عبوری حرکت گردش به چپ تأثیرگذار بوده و به طور هم‌زمان توانایی پیش‌فاز گردش به چپ را دارا هستند است.

بعد از بررسی‌های صورت گرفته بر روی رابطه‌ی بین حجم رویکرد مقابل و حجم حرکت گردش به چپ مشخص گردید که با افزایش حجم خودروهای رویکرد مقابل، مقدار حجم خودروهای گردش به چپ کننده کاهش می‌یابد. این رابطه برای تمام سناریوهای طول سیکل و درصد زمان سبز صدق می‌کند. شکل (۲)، (الف) و (ب) مثالی از این رابطه را ارائه می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، درصد زمان سبز در حجم حرکت گردش به چپ تأثیرگذار است یعنی با افزایش درصد زمان سبز، حجم خودروهای گردش به چپ کننده افزایش و با کاهش آن، کاهش یافته است. همچنین شکل (۲) نشان می‌دهد که

جدول ۲. نتایج مدل‌های رگرسیونی (SPSS)

مدل	متغیر	ضریب	معنی داری	ضریب تعیین
۱	مقدار ثابت معادله	۴۸۳/۶۹۰	۰/۰۰	۰/۸۱۶
	C = طول سیکل	۰/۲۸۱	۰/۰۳	
	%GT = درصد زمان سبز	۱/۲۷۸	۰/۰۰	
	OV = حجم جریان مخالف	-۰/۲۸۴	۰/۰۰	
۲	NL = تعداد خطوط جریان مقابل	-۲۰/۵۰۴	۰/۰۰	۰/۸۳۶
	Constant	۱۰۰۲/۳۴۲	۰/۰۰	
	$\ln((OV \times NL) / (\%GT)^{0.5})$	-۱۲۵/۷	۰/۰۰	



شکل ۳. مقایسه‌ی بین نتایج مدل دوم و مقادیر واقعی

آورده شده است. متغیرهایی که توانایی پیش‌بینی را دارا می‌باشند شامل: حجم رویکرد مقابل، تعداد خطوط رویکرد مقابل، درصد زمان سبز و طول کل سیکل می‌باشند. یک مدل خطی چندگانه با استفاده از این متغیرها ساخته شد که مقدار R^2 به‌دست‌آمده از آن برابر ۰/۸۱۶ است:

$$LT \text{ Volume} = 483.690 + 0.281C + 1.278\%GT - 0.284OV - 20.504NL \quad (۳)$$

محدوده‌ی وسیعی از تبدیلات ریاضی بر روی متغیرهای مستقل انجام گرفت تا به وسیله‌ی آن‌ها بتوان دقت مدل را افزایش داد. علاوه بر این ترکیب متغیرها با یکدیگر نسبت به یک متغیر تنها می‌تواند قدرت تحلیل را افزایش دهد.

مدل به‌دست‌آمده از ارزیابی تبدیلات متغیر جدید از حاصل ضرب حجم رویکرد مقابل در تعداد خطوط، تقسیم بر درصد زمان سبز به دست آمده است. سرانجام یک مدل لگاریتمی با بیشترین ضریب تعیین ($R^2=0/۸۳۶$) ساخته شده است؛ این مدل بیشترین قدرت پیش‌بینی را در محاسبه حجم عبوری حرکت گردش به‌چپ در حالت محافظت نشده را، دارا است. در این مدل، متغیر طول سیکل وارد نشده است اما با توجه به اینکه متغیر درصد زمان سبز از نسبت زمان سبز بر طول کل سیکل به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که طول کل سیکل به‌صورت غیرمستقیم تأثیرگذار است:

$$LT \text{ Volume} = 1002.34 - 125.7 \ln \frac{OV \times NL}{\%GT^{0.5}} \quad (۴)$$

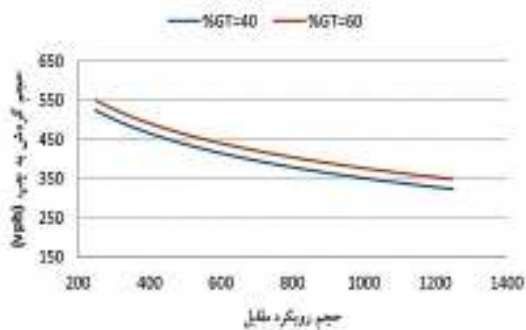
شکل (۳) یک نمودار نقطه‌ای از حجم عبوری پیش‌بینی شده‌ی گردش به‌چپ توسط مدل لگاریتمی ساخته شده و مقادیر دنیای واقعی را نشان می‌دهد.

۴-۲- اعتبارسنجی

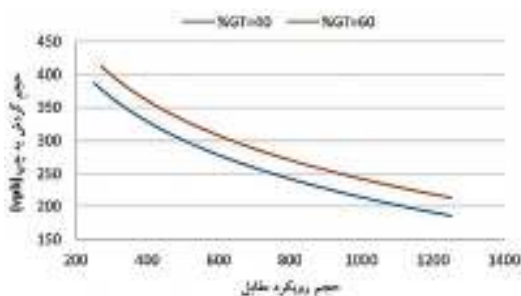
برای اعتبارسنجی مدل رگرسیونی نهایی به دست آمده از روش راهنمای ظرفیت راه‌ها استفاده شده است. ظرفیت حرکت گردش به‌چپ برای فاز محافظت نشده از طریق HCM محاسبه گردید و سپس با مقادیر واقعی موجود مقایسه گشت. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است ظرفیت محاسبه شده از طریق HCM و مقادیر واقعی از یک‌روند مشابه تبعیت می‌کنند. آزمون آماری انجام شده بین این دو ظرفیت، همبستگی بالای ۰/۸۷۶ و ضریب تعیین ۰/۷۶۷ را نشان می‌دهد. اختلاف میانگین بین این دو ظرفیت کوچک است (میانگین ظرفیت مشاهده شده، ۳۳۵ خودرو در ساعت و میانگین ظرفیت HCM، ۲۹۲ خودرو در ساعت است). و آزمون‌های آماری نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در میانگین‌ها وجود ندارد ($p = 0.00$, $t = 16.47$). اعتبارسنجی دیگری بین مقادیر پیش‌بینی شده از مدل و مقادیر به‌دست‌آمده از HCM صورت گرفت. اطلاعات به‌دست‌آمده حاکی از ارتباط بسیار خوبی میان این دو مقادیر است

یکی از مشکلاتی که در طراحی به وسیله ی HCM وجود دارد نیاز به زمان بندی موجود چراغ راهنمایی است که ممکن است در دسترس نباشد. با توجه به این نیاز، وجود تقریبی از درصد زمان سبز چراغ می تواند راهگشای این مشکل باشد. به این صورت که با در نظر گرفتن درصد زمان سبز ۴۰ برای درصدهای کمتر از ۵۰ به عنوان درصد زمان سبز یک رویکرد و درصد زمان سبز ۶۰ برای درصدهای بیشتر از ۵۰ برای رویکرد دیگر می توان از یکی از نمودارهای شکل (۶) که بر اساس مدل رگرسیونی ساخته شده به دست آمده اند، استفاده کرد.

شکل (۶) حجم گردش به چپ را برای دو تعداد متفاوت از خطوط رویکرد مقابل نشان می دهد. در هر نمودار حاصل تلاقی حجم گردش به چپ و حجم رویکرد مقابل نقطه ای خواهد بود که اگر این نقطه در زیر نمودار قرار گیرد فاز محافظت نشده و اگر در بالای آن قرار گیرد باید از فاز محافظت شده استفاده گردد. این نمودارها راهنمای ساده ای هستند که می توانند به سرعت و به آسانی هنگام ارزیابی نوع فاز چراغ در تقاطع ها بکار گرفته شوند.



الف) رویکرد مقابل یک خطه

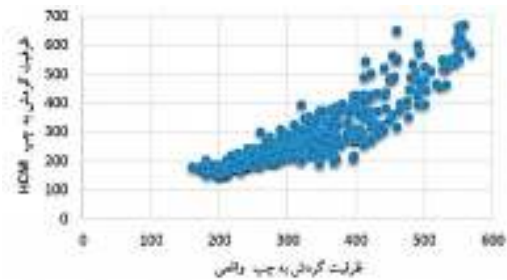


ب) رویکرد مقابل سه خطه

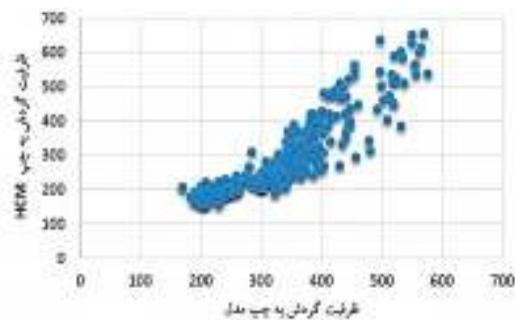
شکل ۶. راهنمای انتخاب فاز گردش به چپ بر اساس درصد زمان

سبز

که نشان می دهد مدل به دست آمده توانایی پیش بینی مقادیر مشابه با مقادیر به دست آمده از HCM را داراست (شکل ۵). اعتبارسنجی صورت گرفته نشان می دهد که استفاده از مدل به دست آمده به عنوان یک رویکرد واقعی برای تخمین مقادیر آستانه ی حجم حرکت گردش به چپ محافظت نشده، قابل قبول است و استفاده از متغیرهای در نظر گرفته شده برای حجم عبوری گردش به چپ محافظت نشده صحیح می باشد.



شکل ۴. مقایسه ظرفیت گردش به چپ واقعی و HCM



شکل ۵. مقایسه ظرفیت گردش به چپ مدل و HCM

در انتخاب نوع فاز یک تقاطع بر پایه ی حجم عبوری گردش به چپ و حجم رویکرد مقابل می توان از HCM استفاده کرد درحالی که روش HCM با قدرت بالا توانایی پیش بینی ظرفیت گردش به چپ را داراست اما این روند بسیار دشوار است و محاسبات دستی آن به صورت سریع و مؤثر تقریباً غیرعملی است. مدل تک متغیره ی ساخته شده توسط این تحقیق یک فهم ساده ای از مدل های ظرفیت گردش به چپ در HCM درحالی که R^2 بالایی را تأمین می کند، ارائه می دهد. این مدل بر پایه ی یک متغیر $\frac{(OV \times NL)}{(\%GT)^{0.5}}$ بیشترین تأثیر بر روی حرکت گردش به چپ را در ساده ترین فرم ارائه می دهد.

۴-۳- شبیه‌سازی

درصد زمان سبز و حجم مستقیم روی رویکرد مقابل ساخته شد تا حالت بحرانی فاز محافظت نشده بر اساس این دو متغیر تعیین گردد (جدول (۳)).

تقاطع‌های مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار AIMSUN شبیه‌سازی شدند. پس از بررسی وضعیت موجود ۲۵ سناریوهای مختلف بر اساس متغیرهای

جدول ۳. تعریف سناریوهای مختلف

ردیف	سناریو	تأخیر (sec)	چگالی (veh/Km)	سرعت متوسط (Km/hr)	زمان سفر (sec)
۱	پایه	۶۷	۲۸/۳۵	۲۳/۱۵	۱۸۰/۹
۲	درصد زمان سبز = ۲۶٪	۹۸	۲۹	۲۱	۲۱۲
۳	درصد زمان سبز پلیس = ۴۴٪	۵۵	۲۴	۲۳	۱۶۹/۱
۴	درصد زمان سبز پلیس = ۵۳٪	۶۴	۲۳/۸۸	۲۳	۱۷۷/۶
۵	درصد زمان سبز پلیس = ۶۱٪	۱۱۴	۳۷	۲۱	۲۲۷/۵
۶	درصد زمان سبز ابودر = ۲۷٪	۱۸۲	۴۴	۱۹/۷	۲۹۶/۲
۷	درصد زمان سبز ابودر = ۳۵٪	۱۳۲/۱۲	۴۶	۲۱/۱۵	۲۴۵/۶۵
۸	درصد زمان سبز ابودر = ۵۰٪	۷۵	۲۷	۲۲	۱۸۹/۳
۹	درصد زمان سبز ابودر = ۵۸٪	۱۰۱	۳۱	۲۱	۲۱۵/۲
۱۰	درصد زمان سبز پلیس = ۴۴٪ درصد زمان سبز ابودر = ۵۰٪	۷۷	۲۸	۲۲	۱۹۱/۴
۱۱	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۱۰٪ افزایش	۶۷	۲۸/۳۵	۲۳/۱۵	۱۸۰/۹
۱۲	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۱۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۰۸/۲	۳۰/۴۱	۱۹/۸	۲۲۱/۷
۱۳	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۲۰٪ افزایش	۶۴/۶۳	۲۸/۹۸	۲۲/۶۰	۱۷۷/۸۵
۱۴	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۲۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۱۳/۷	۳۳/۱۸	۱۹/۷۳	۲۲۷/۱
۱۵	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۳۰٪ افزایش	۷۷/۲۳	۲۸/۶۶	۲۲/۱۳	۱۹۰/۶۱
۱۶	نسبت (P) تقاطع پلیس و تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش	۶۴/۷۲	۲۶	۲۲/۳۸	۱۷۷/۹۷
۱۷	نسبت (P) تقاطع پلیس و تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۱۱/۳۳	۳۷/۷۹	۲۱/۸۷	۲۲۴/۸۵
۱۸	نسبت (P) تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش	۷۶/۰۸	۳۲/۴۵	۲۲/۶۲	۱۸۹/۴۵
۱۹	نسبت (P) تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۱۹/۸۸	۳۳/۹۸	۱۹/۳۵	۲۳۳/۲۶
۲۰	نسبت (P) تقاطع ابودر = ۲۰٪ افزایش	۸۵/۴۳	۳۲/۶۰	۲۲/۱۶	۱۹۸/۷۶
۲۱	نسبت (P) تقاطع ابودر = ۲۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۲۵/۳۵	۳۵/۴۳	۱۹/۱۰	۲۳۸/۷۴
۲۲	نسبت (P) تقاطع ابودر = ۳۰٪ افزایش	۶۹/۱۰	۲۹/۱۲	۲۲/۰۴	۱۸۲/۴۱
۲۳	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۲۰٪/و تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش	۱۱۷/۷۷	۴۲/۵۵	۲۱/۵۸	۲۳۱/۲۱
۲۴	نسبت (P) تقاطع پلیس = ۲۰٪/و تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۱۰	۱۳۱/۲۲	۳۳/۴۵	۱۸/۳۹	۲۴۴/۶
۲۵	نسبت (P) تقاطع پلیس و تقاطع ابودر = ۱۰٪ افزایش به همراه سناریو شماره ۳	۱۰۱/۸۹	۳۷/۵۶	۲۲/۲۷	۲۱۵/۴

مطابق با رابطه (۵) نرخ تردد حرکت گردش به چپ در سناریو پایه و سناریو نهایی برای تقاطع ابوذر برابر است با:

$$Q = 9/45 \times 23/15 = 218 \text{ (veh/h)} \quad \text{سناریو پایه:}$$

$$Q = 12/52 \times 22/27 = 279 \text{ (veh/h)} \quad \text{سناریو نهایی:}$$

و برای تقاطع پلیس برابر است با:

$$Q = 14/17 \times 23/15 = 328 \text{ (veh/h)} \quad \text{سناریو پایه:}$$

$$Q = 18/78 \times 22/27 = 418 \text{ (veh/h)} \quad \text{سناریو نهایی:}$$

با توجه به نتایج بالا ظرفیت خط مشترک حرکت گردش به چپ و مستقیم رو تحت شرایط ترافیکی ساعت اوج عصرگاهی و با در نظر گرفتن پارامترهای تأخیر، چگالی، سرعت و طول زمان سفر، برای تقاطع ابوذر برابر ۲۷۹ خودرو بر ساعت و برای تقاطع پلیس ۴۱۸ خودرو بر ساعت می‌باشد، به این معنا که در صورت افزایش حجم این خط از مقدار محاسبه شده، ممکن است شبکه با مشکل انسداد مواجه شود. بنابراین در صورت افزایش حجم، ایجاد فاز محافظت شده برای حرکت گردش به چپ الزامی است.

۵- نتیجه گیری

همان‌طور که اشاره شد فازبندی چراغ راهنمایی یکی از مؤلفه‌های بحرانی تقاطع‌های چراغ‌دار می‌باشد زیرا موجب افزایش ایمنی و عملکرد مؤثر تقاطع می‌گردد. درحالی‌که حرکت محافظت شده می‌تواند باعث افزایش ظرفیت و ایمنی شود اما می‌تواند موجب کاهش زمان سبز و در نتیجه افزایش تأخیر، تراکم و حتی کاهش ایمنی گردد. بنابراین ضرورت تعیین فازبندی مناسب اهمیت زیادی در مطالعات دارد. استفاده از راهنمای ظرفیت راه‌ها برای محاسبه‌ی ظرفیت دارای محاسبات پیچیده و نیازمند طیف وسیعی از داده‌های ترافیکی می‌باشد. اگرچه ویرایش اخیر راهنمای ظرفیت راه‌ها این پروسه را مقداری ساده‌تر کرده است اما هنوز کمبود داده موضوعی اساسی است. بنابراین در این پژوهش

محدوده‌ی تغییرات این دو متغیر در جداول (۴) و (۵) آورده شده است. پس از ترکیب سناریوهای تعریف شده بهترین سناریو انتخاب و به عنوان سناریوی نهایی ارائه می‌گردد. با توجه به خروجی‌های هر یک از سناریوها و مقایسه‌ی آن‌ها با سناریو پایه، مشخص گردید که سناریو با افزایش ۱۰ درصدی حجم خطوط گردش به چپ در دو تقاطع پلیس و ابوذر و همچنین تغییر درصد زمان سبز تقاطع پلیس به اندازه‌ی ۱۰ درصد، بهترین سناریو تعریف شده در حالت محافظت نشده می‌باشد. پارامترهایی که در ارزیابی سناریوها مورد بررسی قرار گرفتن تأخیر، چگالی، سرعت و طول زمان سفر می‌باشند.

جدول ۴: تغییرات درصد زمان سبز

تقاطع	محدوده تغییرات درصد زمان سبز
پلیس	٪۶۱ - ٪۲۶
ابوذر	٪۵۸ - ٪۲۷

جدول ۵: محدوده تغییرات حجم

تقاطع	محدوده تغییرات حجم خط مشترک گردش به چپ و مستقیم رو
پلیس	افزایش یا کاهش ٪۲۰ - ٪۱۰ حجم خط مشترک
ابوذر	افزایش یا کاهش ٪۲۰ - ٪۱۰ حجم خط مشترک

با توجه به اینکه هدف اصلی از این مدل‌سازی تعیین ظرفیت حرکت گردش به چپ در تقاطع‌های چراغ‌دار می‌باشد با استفاده از پارامتر خروجی چگالی، ظرفیت حرکت گردش به چپ محاسبه گردید. برای محاسبه‌ی ظرفیت از رابطه اساسی جریان ترافیک که در HCM ارائه شده است استفاده شد:

$$Q = V \times D \quad (5)$$

در این رابطه:

Q: نرخ تردد برحسب وسیله نقلیه بر ساعت

V: سرعت متوسط برحسب کیلومتر بر ساعت

D: چگالی برحسب وسیله نقلیه بر کیلومتر

جامع‌تری به دست می‌آید که می‌توان آن را برای دیگر تقاطع‌ها نیز تعمیم داد. در تحقیقات آینده باید پارامتر ایمنی در انتخاب نوع فاز گردش‌به‌چپ مورد تجزیه و تحلیل بیشتر قرار گیرد؛ زیرا ممکن است عملکرد ایمنی قبل از آنکه حرکت گردش‌به‌چپ به ظرفیت خود برسد، کاهش پیدا کند. همچنین عابران پیاده یکی از مؤلفه‌های اصلی تقاطع‌ها بشمار می‌آیند که پیشنهاد می‌گردد تأثیر عبور آن‌ها بر روی ظرفیت حرکت گردش‌به‌چپ مورد بررسی قرار گیرد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Highway Capacity Manual
2. Manual on Uniform Traffic Control Device
3. Agent
4. Cottrell
5. Gap Acceptance
6. Lin and Machemehl
7. Levinson
8. Craus & Mahalel

۷- مراجع

-Agent, K.R., (1979), "An Evaluation of Permissive Left-turn Phasing. Research Report 519". Kentucky Department of Transportation, Frankfort, K.

-Agent, K.R., (1985), "Guidelines for the Use of Protected/Permissive Left-turn Phasing", Report UKTRP-85-19. Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, Lexington, KY.

-Agent, K, Stamatiadis, N, Dye, B., (1995), "Guidelines for the Installation of Left-Turn Phasing", Report KTC-95-23. Kentucky Transportation Research Center, University of Kentucky, Lexington, KY.

-Al-Kaisy, A. F., & Stewart, J. A., (2001), "New approach for developing warrants of protected left-turn phase at signalized intersections Transportation Research Part A: Policy and Practice", 35(6), pp.561-574.

به‌منظور ساده‌سازی این روند یک مدل حجم گردش‌به‌چپ تک متغیره بر اساس داده‌های دنیای واقعی، پیشنهاد شده است. نتیجه حاصل از بررسی‌های این پژوهش به صورت زیر است:

الف) مدل ارائه شده (معادله ۴) بر اساس سه متغیر حجم رویکرد مقابل، تعداد خطوط رویکرد مقابل و درصد زمان سبز ارائه شده که حاکی از بیشترین تأثیر این سه متغیر می‌باشد.

ب) اشکال (۳) تا (۵) نشان از تطابق مناسب نتایج با روش HCM دارد و یک‌راه ساده و مؤثر در تخمین حجم گردش‌به‌چپ و تعیین فاز محافظت‌شده در صورت نیاز، می‌باشد. پیاده‌سازی این مدل ساده مانند استفاده از نمودارها باعث انجام یک تحلیل سریع برای برنامه‌ریزی تقاطع‌ها می‌گردد. مقایسه‌ی روش HCM برای محاسبه‌ی حرکت گردش‌به‌چپ محافظت نشده با پیش‌بینی‌های مدل ساخته‌شده نشان می‌دهد که مدل در عین سادگی نتایج بسیار نزدیک به نتایج HCM را داراست.

ج) مزیت دیگر این مدل فقدان نیاز به هرگونه نرم‌افزار و توانایی تصمیم‌گیری برای فاز گردش به چپ از طریق یک نمودار (شکل ۶) است. مقایسه‌ی این مدل با HCM اعتبار کافی را برای این مدل تأمین کرده و مبنا و پایه‌ی مناسبی را برای مطالعات بعدی در زمینه‌ی ایمنی را فراهم می‌کند.

د) با استفاده از مدل شبیه‌سازی‌شده می‌توان نوع فاز مناسب حرکت گردش‌به‌چپ را از طریق ظرفیت شبیه‌سازی‌شده و با حفظ معیار ایمنی تعیین نمود. با استفاده از سناریوهای ساخته‌شده در مدل شبیه‌سازی، بحرانی‌ترین حالت ظرفیت حرکت گردش‌به‌چپ در حالت محافظت نشده مشخص شد. یعنی در صورتی که درصد زمان سبز تقاطع پلیس یابد و هم‌زمان با آن نسبت (v/c) هریک از تقاطع‌ها ۱۰ درصد افزایش یابد، ظرفیت حرکت گردش‌به‌چپ در حالت بحرانی قرار گرفته و نیازمند تغییر فاز از حالت محافظت نشده به فاز محافظت‌شده می‌باشد. درنهایت توانایی معادلات ساده ارائه‌شده در این مطالعه در ارزیابی پروسه تصمیم‌گیری برای انتخاب فاز گردش‌به‌چپ از نقطه نظر ایمنی و عملکردی، گامی بزرگ در ساده‌سازی فرایند برنامه‌ریزی می‌باشد.

نتایج این پژوهش حاصل تحلیل بر روی دو تقاطع شهر اصفهان می‌باشد بنابراین در صورتی که تقاطع‌های بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد شبکه مدل‌سازی گسترده‌تر شده و نتایج

- Koonce, P., (2008), "Traffic signal timing manual (No. FHWA-HOP-08-024)". United States. Federal Highway Administration.
- Levinson, H. S. (1989), "Capacity Of Shared Left-Turn Lanes-A Simplified Approach" Transportation Research Record.
- Stamatiadis, N., Tate, S., & Kirk, A. (2016), "Left-turn phasing decisions based on conflict analysis". Transportation Research Procedia, 14, pp.3390-3398.
- Transport Research Board. (2010), "Highway Capacity Manual (HCM)". Washington DC.
- Yanxi, H., & Xiaoguang, Y. (2013), "Research on the Delay in Signalized Intersection with Left-turn Special Phase". Procedia-Social and Behavioral Sciences, 96, pp. 2211-2218.
- Chen, L., Chen, C., & Ewing, R. (2015), "Left-turn phase: Permissive, protected, or both? A quasi-experimental design in New York City".
- Cottrell, B.H. (1985), "Guidelines for Exclusive/Permissive Left-turn Signal Phasing", Research Report VHTRC 85-R19. Virginia Highway & Transportation Research Council, Charlottesville, VA.
- Craus, J., & Mahalel, D. (1986), "Analysis of operation and safety characteristics of left-turn lanes". ITE journal, 56(7), pp.34-39.
- Dion, F., Rakha, H., & Kang, Y. S. (2004), "Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections". Transportation Research Part B: Methodological, 38(2), pp.99-122.