

# بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش

## عرض باند عبوری (مطالعه موردی: شهر قزوین)

امیرمسعود رحیمی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

سعید طاهری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: amrahimi@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۵

### چکیده

در شبکه‌های حمل و نقل شهری، تقاطع‌ها به عنوان گره بیشترین تاخیر را به کاربران شبکه وارد می‌کنند. وقتی که تقاطعات یک راه شریانی نزدیک یکدیگر واقع شده باشند، عملکرد آن‌ها به شدت تحت تاثیر یکدیگر خواهد بود، بنابراین رابطه بین طرح‌های زمانبندی تقاطعات مجاور هم بروی ظرفیت کلی مسیر تاثیر می‌گذارد. در این پژوهش اثرات اجرای کنترل هماهنگ تقاطع‌های متوالی باروش عرض باند عبوری مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور دو شبکه از تقاطع‌های تحت کنترل هوشمند مرکزی شهر قزوین برای مطالعه‌ی اصلی و اعتبارسنجی انتخاب گردیدند. داده‌های به دست آمده از برداشت میدانی، در نرم‌افزار شبیه‌ساز سینکرو وارد و تقاطع‌ها به منظور به دست آوردن نتایج شبیه‌سازی و سناریوهای مختلف تعریف گردید. براساس نتایج، در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج، بهینه‌سازی از طریق کنترل هماهنگ تقاطع‌ها شاخص‌های کارآیی را از جمله تاخیر کل ۱۰ درصد، توقف کل ۶ درصد، سرعت متوسط ۱۲ درصد، زمان سفر ۸ درصد، سوخت مصرفی ۷ درصد و طول صف را ۲۵ درصد بهبود می‌بخشد، علاوه بر این در چارچوب پژوهش به اثرات اجرای فازگردشی تاخیری و همچنین شرایط غیر اشباع بر کیفیت هماهنگ‌سازی پرداخته شده است. در پایان با انجام اعتبارسنجی، صحت نتایج بدست آمده مورد تایید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تقاطع، سینکرو، عرض عبوری، هماهنگ‌سازی

## ۱. مقدمه

طی دهه‌های گذشته تلاش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی زمان بندی تقاطع‌ها صورت گرفته است که همچنان نیز ادامه دارند. حداقل شش اقدام اصلی برای کنترل ترافیک تقاطع‌ها وجود دارد که عبارتند از: تابلوهای توقف، تابلوهای حق تقدم (احتیاط)، جداسازی مسیر رفت و برگشت، میدین و دوایر گردشی، تقاطع بدون کنترل و نهایتاً تقاطع‌های دارای چراغ کنترل ترافیک. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای گشودن گره کور ترافیک در شهرها بهینه‌سازی شرایط ترافیکی در تقاطع‌ها و استفاده از روش‌های نوین در کنترل ترافیک است. نصب چراغ‌های راهنمایی با هدف اولویت بندی و اعطای حقوق برابر به کلیه وسایل نقلیه و عابرین پیاده در تقاطع‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین عملکرد مناسب چراغ‌های راهنمایی تاثیر بسزایی در افزایش کارایی تقاطع دارند. زمان بندی و فاز بندی مناسب منجر به کاهش تاخیر وارد بری کاربران شهری و نیز کاهش فشار روانی رانندگان و اثرات مخرب ایمنی آن و صرفه جویی در مصرف سوخت و انرژی خواهد شد [Bonneson et al. 2011].

یکی از ابزارهای ارزشمند مهندسان برای نیل به هدف حفظ و کنترل این تقاطع‌ها در حالت بهینه مدل‌های شبیه‌سازی رایانه ای است. برخی از مزایای این مدل‌ها نسبت به اقدامات و کارهای اجرایی شامل: هزینه ای بسیار پائین تر، مشخص شدن سریع نتایج، اندازه گیری سریع معیارهای کارایی، جلوگیری از مسدود شدن مسیر به منظور آمادگی برای اجرای طرح و خود اجرای طرح است. گاهی اوقات برخی از تغییرات طرح هندسی در حالت عادی امکان پذیر نیست، برای پیش بینی شرایط و تقاضای آینده حتما نیاز به شبیه‌سازی است و نهایتاً در حین شبیه‌سازی می‌توان بسیاری از پارامترها را ثابت نگه داشت [Bonneson, Pratt and Zimmerman, 2009].

## ۲. اهمیت مسأله

هنگامی که محدوده مورد مطالعه شامل شبکه شریانی با حجم ترافیک بالا نسبت به معابر فرعی باشد و در سطح این شریانی‌ها، چندین تقاطع نزدیک به هم (کمتر از ۲۶۰۰ فوت بر مبنای توصیه آئین‌نامه ظرفیت راه‌های آمریکا) وجود داشته باشد، هماهنگ‌سازی تقاطع‌های چراغدار بهترین گزینه جهت کنترل تقاطع‌ها است. با بالا بودن حجم ترافیک و تعداد تقاطع‌های

چراغدار در یک شریانی، بهترین گزینه از دیدگاه مهندسان ترافیک بهبود عملکرد چراغهای راهنمایی از طریق دادن مجوز به گروهی از وسایل نقلیه به طوریکه که بدون توقف از تعدادی چراغ راهنمایی یک شبکه عبور نمایند که این روش، موج سبز یا پیشروی نامیده می‌شود. هدف اصلی از هماهنگ‌سازی تقاطع‌ها امکان ایجاد یک پیشروی آرام و پیوسته برای دسته‌ای از خودروها از تقاطع‌های واقع در امتداد یک راه شریانی و در نتیجه کاهش زمان سفر، توقف‌ها و تاخیر است. به همین دلیل هماهنگ‌سازی تقاطع‌ها در معابر شهری، از اهمیت بسیاری در جهت کاهش ترافیک برخوردار است که در این تحقیق تلاش می‌گردد تا با یک مطالعه موردی، اهمیت آن بیش از پیش آشکار گردد.

## ۳. پیشینه تحقیق

با افزایش بی‌رویه تقاضا در نقطه‌ای از شبکه‌های حمل و نقل، طرح‌های ترافیکی اجرا شده جوابگوی تقاضای حمل و نقل شهروندان نیست. به طور کل نشان داده شده است که حمل و نقل اثرات زیانباری بر محیط زیست نیز دارد که از میان آنها می‌توان به اسیدی سازی، اثرات سمی بر روی اکوسیستم و بشر و سروصدا اشاره کرد [علینقیان و نادری پور، ۱۳۹۵]

طرح‌های پرهزینه‌ای مانند افزودن به میزان عرضه شبکه حمل و نقل همچون احداث بزرگراه‌های موازی، تعریض معابر موجود، ایجاد تقاطع‌های غیر همسطح از جمله راهکارهای کاهش معضلات ترافیک امروزی است. معمولاً این نوع راهکارها به دلیل به صرفه نبودن از نظر زمان احداث و همچنین صرف بودجه‌های کلان برای ساخت آن، ترجیحاً نباید به عنوان راهکار اولیه انتخاب شوند. در چنین شرایطی؛ راهکارهای مدیریتی در زمینه عرضه و تقاضا، عموماً با استفاده از راه‌حل‌های موقت برای مشکلات موجود مطرح هستند [رحیمی، باقری، دزفولیان شهنی و مظاهری، ۱۳۹۵]

در اوایل دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی پایه‌های مطالعه بر روی هماهنگ‌سازی تقاطع‌ها بنا شد. در ابتدا با نوشتن الگوریتم‌ها و روش‌های دستی و در ادامه رسیدن به نرم‌افزارهای رایانه‌ای و توسعه این موارد انجام شد. هماهنگ‌سازی، مزایا و معایب مختص خود را داراست و بسته به شرایط موجود ممکن است مفید یا مخرب باشد. اولین مزیت ایجاد طرح هماهنگ‌سازی کاهش میزان تاخیر و توقف‌ها مخصوصاً برای راه شریانی است

داده اند. آنها در کار خود یک برداشت میدانی و شبیه سازی با نرم افزار ایمسان و سینکرو انجام داده اند. نتایج حاصل شده نشانگر آن است که در شرایط فوق اشباع، به دلیل پس زدگی صف و عدم توانایی چراغ پایین دست در تخلیه مناسب رویکرد، استفاده از روش پیشروی معکوس و در شرایط زیر اشباع استفاده از پیشروی مستقیم بهترین گزینه جهت هماهنگ سازی شبکه هستند. پیشروی ساده به آن نوع پیشروی گفته می شود که در آن تمام چراغهای راهنمایی طوری تنظیم می شوند که وسایل نقلیه ای که از اولین تقاطع رها می شوند به تمام تقاطع های پایین دست، دقیقاً در لحظه ای که چراغ آنها تبدیل به سبز می شود، برسند. پیشروی ساده منجر به موج سبزی می گردد که علت این نامگذاری اثری است که پیشرفت تصویر بصری علامت سبز به سمت پایین خیابان، بر بیننده می گذارد. تحت شرایط خاصی صف های داخلی وسایل نقلیه به حدی بزرگ هستند که اختلاف فاز ایده آل منفی می شود؛ در چنین شرایطی چراغ راهنمایی تقاطع پایین دست، باید قبل از چراغ راهنمایی تقاطع بالادست سبز شود تا زمان کافی برای شروع حرکت وسایل نقلیه موجود در صف، قبل از رسیدن گروه وسایل نقلیه به آنها، اختصاص داده شود. بنابراین به چنین پیشروی تحت عنوان پیشروی معکوس اشاره می گردد. در حالت پیشروی ساده مقدار آفست از تقسیم فاصله تقاطع ها بر سرعت پیشروی بدست می آید. در حالت فوق اشباع روابط پیچیده تری وجود داشته و برای جزییات بیشتر به منبع ارجاع داده می شود [ افندی زاده، حاج محمدی و دهقانی، ۱۳۹۰ ]

بر اساس مراجع اصلی علم مهندسی ترافیک [ Mcshane , Roess and Prassas, 2010 ] سه عامل اصلی هماهنگ سازی شامل: طول چرخه، قابلیت هماهنگ شدن و اختلاف زمانی آفست است. در مورد طول چرخه باید به دنبال یک طول چرخه متعادل برای کلیه تقاطع های شبکه بود. قابلیت هماهنگ شدن: یک سوال اساسی در بحث هماهنگ سازی تقاطعات این است که کدام تقاطع ها با چه ویژگی هایی می توانند هماهنگ شوند؟ پاسخ این سوال به ملاحظات مختلفی مثل حجم ترافیک، طول شاخه ها، سرعت، نقاط دسترسی و... بستگی دارد. به این منظور با ترکیب کردن حجم ترافیک و طول قطعه راه شاخص همراهی را ایجاد نموده اند (رابطه ۱). تحقیقات نشان داده که برای قطعه هایی با شاخص ۰/۵ یا بیشتر، بویژه آن دسته از تقاطع ها که مجاور هم هستند، باید در یک گروه دسته

که نتیجه عبور بی وقفه دسته خودروها از تقاطعات متوالی است. از دیگر مزایای هماهنگ سازی می توان به کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه ای، حفظ سرعت سفر مناسب، حرکت دسته خودروها از میان تقاطعات متوالی اشاره نمود. عواملی که مزایای هماهنگ سازی را محدود می کنند عبارتند از: عدم ظرفیت کافی راه، وجود پارکینگ کنار خیابان، دسترسی ها، بارگیری ها، پارک های دو بله، تقاطعات دارای طرح هندسی پیچیده، تنوع زیاد در سرعت ترافیک، فضای حرکتی محدود تقاطع، حجم گردش زیاد و حتی حجم عبیران پیاده که آن ها به زمان بیشتری برای عبور نیاز دارند.

نیانگاری و همکاران با انجام یک مطالعه میدانی در منطقه کوماسی کشور غنا به بررسی اثرات هماهنگ سازی تقاطع های چراغ دار بر روی معیارهای ارزیابی کیفیت به کمک نرم افزار سینکرو پرداخته اند. با انجام برداشت های میدانی گسترده برای داده های ضروری از جمله طرح هندسی و کنترل چراغ و انجام شبیه سازی، به این نتیجه رسیدند که اجرای این طرح هماهنگ شده اکثر معیارهای کیفیت مثل تاخیر و توقف را بهبود می بخشد، همچنین نشان دادند که ترکیب این طرح هماهنگ با اصلاح توالی فازها و طرح هندسی نیز بهبود قابل توجهی خواهد داشت [Nyantakyi et al. 2013].

کونس و همکاران در گزارشی در مورد هماهنگ سازی چراغ های ترافیک به موارد زیر اشاره کرده است: هماهنگ سازی چراغ ها اثرات مهمی بر رفتار رانندگان می گذارد، با کاهش تاخیر و توقف ها و اثرات روانی منفی آن باعث کاهش تصادفات می شود. از مزایای هماهنگ سازی رسیدن به هدف سرعت های سفر بهینه، کاهش تاخیرها و حداقل کردن توقف ها است. مطالعات ملی نشان می دهد که زمان سفر حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می یابد. محدود کردن و یا به تاخیر انداختن نیاز به اصلاحات هندسی راه و ایجاد شرایط برای واکنش های اورژانسی به حوادث در منطقه ی شریانی کاهش آلودگی و مصرف سوخت از دیگر مزایای هماهنگ سازی است. این گزارش در مورد شرایط سخت هماهنگ سازی به موارد زیر اشاره نموده است: سرعت متغیر خودروها، حجم بالای عبیران پیاده، طول چرخه چراغ، ملاحظات ایمنی، رفتار متغیر رانندگان و فرهنگ ترافیکی منطقه [Koonce et al. 2008].

افندی زاده و همکاران در پژوهشی با عنوان هماهنگ سازی بهینه کنترل چراغ ها در معابر شهری فوق اشباع و زیر اشباع را انجام

## بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....

سسمه و فورس با انجام پژوهشی تحت نام چراغ‌های خود بهینه‌سازی در ایالات متحده، به بررسی انواع کنترل چراغ بروی هماهنگ‌سازی پرداخته‌اند. از نظر آن‌ها کنترل هوشمند در کنار مزایای چشمگیر خود دارای ضعف در توانایی ایجاد پیشروی مناسب در سطح راه شریانی است. هر چند یکی از رایج‌ترین کارها در حالت هوشمند استفاده از یک طول چرخه طولانی است، اما همان طول چرخه دارای نواقصی چون عدم انعطاف‌پذیری در برابر الویت به جریان و استفاده بهینه از ظرفیت در شرایط فوق است. در این پژوهش سعی شده که با اصلاح قواعد کنترل هوشمند نواقص فوق برطرف شده و هماهنگ‌سازی بهبود یابد. از جمله این اصلاحات اضافه کردن ثانویه زمان سبز برای تنظیمات سبز مناسب با خودروها و جریان‌های ورودی تصادفی است. مطالعه میدانی حدوداً ۱۴٪ کاهش اخیر را برای استفاده از روش تقاطع خود بهینه‌سازی نشان می‌دهد [Cesme and Furth, 2014].

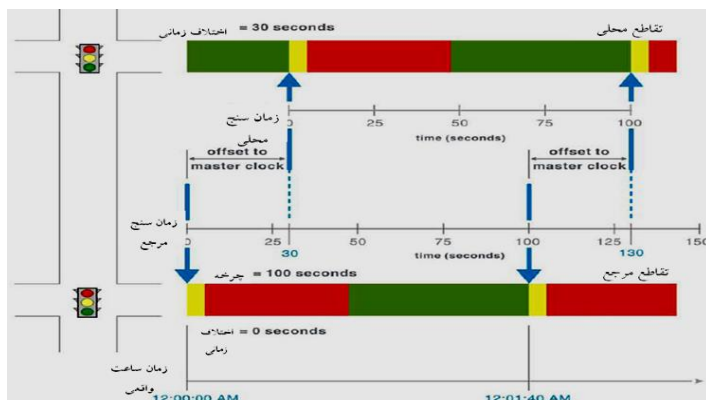
پانچیه و همکاران در سال ۲۰۱۷ [Yanije et al. 2017] یک طرح هماهنگ‌سازی چراغ براساس میزان آلاینده‌های خودرو در شهر گوانگژو چین ارائه کردند. با در نظر گرفتن محدودیت‌های روش جبری، روش منحنی ورود و خروج برای آن پیشنهاد گردید و از نرم‌افزار ویسیسیم جهت شبیه‌سازی استفاده کردند. همچنین از الگوریتم ژنتیک به منظور کاهش همزمان تأخیر و آلاینده خودروها استفاده کردند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از این طرح، میزان آلاینده‌گی ۲۸/۸ درصد برای وسایل حمل و نقل عمومی و ۱۸/۷ درصد برای تمامی خودروها کاهش می‌یابد.

بندی و هماهنگ شوند. البته برای شاخص ۰/۳ تا ۰/۵ هم هماهنگی سازی می‌تواند مفید باشد.

$$CI = V/L \quad (1)$$

که در آن CI شاخص زوجیت، V حجم ترافیک دو طرفه بر حسب خودرو بر ساعت و L طول قطعه بر حسب فوت است. اختلاف زمانی آفست - مطابق شکل ۱ این زمان تأثیر ویژه‌ای بر طرح زمانبندی هماهنگ سیستم تقاطع‌ها دارد. هرگونه ایجاد تغییری در آن بر پارامترهای هماهنگ‌سازی اثر می‌گذارد و کیفیت پیشروی خودروها را تغییر می‌دهد. "بهترین روش برای بدست آوردن اختلاف زمانی آفست بهره‌گرفتن از نرم‌افزارهای رایانه ای که به این منظور تولید شده‌اند است"، البته برای شرایط زیر اشباع جریان محاسبه آفست با استفاده از روش کل ۲ و با بهره‌گیری از دیاگرام فاصله-زمان ارائه شده است. روش کل به دنبال تعیین یک ترکیب مناسب برای طول چرخه و زمان آفست بر اساس توالی فازها و طول قطعه‌ی راه‌ها است.

چن و همکاران در پژوهش خود بروی هماهنگ‌سازی تقاطع‌های چراغدار شهر پکن کشور چین و با کمک شبیه‌سازی روش زمان، مکان، جریان را ابداع نمودند. نتایج آماری حاصل از برداشت میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری حاکی از بهبود معیارهای ترافیکی با بکار بردن روش مورد نظر به جای هماهنگ‌سازی متداول است. روشی که دارای سه مرحله اصلی آماده‌سازی طرح اولیه مکان و یکپارچگی زمان-مکان که بهینه شود است. شکل الگوریتم و جزئیات بیشتر در منبع ارایه شده است [Chen, Zhang and Chen, 2012].



شکل ۱. مفهوم شماتیک آفست

خواهد بود و تاخیر کل بسیار کاهش خواهد یافت. از دیگر کاربردهای این روش در تقاطع‌های T شکل است، که روابط کامل در منبع ارایه شده است [Xiaoqing, Dong and Huang, 2014].

### ۳-۱ عرض عبوری و تداخلات آن

یکی از رایج‌ترین روندهای هماهنگ‌سازی تقاطع‌های چراغ‌دار نزدیک به هم، روش عرض عبوری است، که در پژوهش حاضر نیز از همان اصول پیروی شده است. یکی از کامل‌ترین منابع برای روش عرض عبوری کتاب "توسعه راهنمای اجرای چراغ کنترل ترافیک" نوشته بانسن و همکاران است. روش عرض عبوری تقاطع‌های خیابان اصلی را به صورت مجموعه‌ای متوالی از بخش‌های جدا از هم توسط گره‌ها مدل سازی می‌کند، به عبارت دیگر هر گره می‌تواند نمایانگر وجود یک تقاطع چراغدار و یا یک تغییر آشکار در سرعت ترافیک و یا هر دو عامل باشد. داده‌های مورد نیاز برای توصیف خیابان اصلی شامل: محل گره‌ها در طول خیابان، نوع گره (تقاطع یا تغییر سرعت)، سرعت قطعه، طول چرخه سیستم، تقسیم بندی فازها برای فازهای هماهنگ شده، بازه زمانی تغییر فاز، توالی فازها برای فازهای چپ گرد هماهنگ شده و بازه زمانی آفست برای فاز هماهنگ شده است. یک نمای شماتیک از روش عرض عبوری که در نرم‌افزار سینکرو نیز تعبیه شده است، در شکل ۲، شامل ۴ چراغ هماهنگ و با فاصله یکسان L نشان داده شده است. خط چین‌های رسم شده مربوط به زمان سبز و قرمز است. برای هر دو جهت حرکت ۳ چرخه چراغ نشان داده شده است. بازه زمانی سبز به میزان نصف طول چرخه است. همانطور که قبلاً ذکر شد باند پیشروی را برای هر دو جهت حرکت ترافیک با دو خط شیبدار که از میان زمان سبز تقاطعات می‌گذرند ترسیم می‌شود. سیستم هماهنگ در شکل ۲ یک فرض ایده‌آل را نشان می‌دهد، زیرا که در آن از تمام بازه‌ی سبز استفاده می‌شود. بازه‌ی آفست بین صفر تا  $c/2$  خواهد بود و هر زمان که تقاطعات شماره فرد زمان سبز را نشان دهد برای تقاطعات شماره زوج زمان قرمز خواهد بود حالت کلی محاسبه طول چرخه برای روش پیشروی باند عبوری از رابطه (۲) است. [Bonneson, Pratt and Zimmerman, 2009]

$$C = 2 * \frac{L}{1.47V} \quad (2)$$

مطالعات هماهنگ سازی چراغ‌ها در شهرهای هوشمند نیز مورد علاقه محققین در سال‌های اخیر واقع شده است. در یک تحقیق، لی و همکاران [Li et al. 2017] یک روش بهینه سازی و هماهنگ‌سازی ۲ مرحله‌ای پیشنهاد کردند که در مرحله اول، تنظیمات چراغ راهنمایی به منظور حداقل سازی زمان سفر میانگین راننده تشخیص داده می‌شود، در حالی که در مرحله دوم، تلاش می‌شد تا تعادل شبکه محاسبه شود. نتایج نشان داد که در هنگام شب که حجم ترافیک ثابت می‌ماند، بهتر است کمتر چراغ‌ها بهینه سازی شوند.

ژانگ و همکاران [Zhang et al. 2016] در سال ۲۰۱۶ یک مدل هماهنگ‌سازی برای خیابان‌های شریانی با طول بلند و شبکه‌های شطرنجی ارائه دادند. آنها در تحقیق خود دو مدل را پیشنهاد دادند که بر مشکل هماهنگ‌سازی چراغ‌ها غلبه کنند. طرح پیشنهادی آنها می‌توانست برنامه‌های جزئی و برنامه‌های کلی در خیابان‌های شریانی را هماهنگ کند و به طور مستقیم آفست تمامی چراغ‌ها را در شبکه بهینه کند. سپس آنها طرح پیشنهادی خود را با برنامه‌هایی که توسط نرم‌افزار سینکرو داده شده بود، مقایسه کردند.

راخا و همکاران با انجام پژوهشی با نام "هماهنگ‌سازی چراغ‌ها در سراسر شبکه" به بررسی اثرات هماهنگ‌سازی بروی معیارهای کارایی پرداختند. آنها سه دوره مطالعه میدانی بر روی ۲۱ چراغ کنترل ترافیک در شهر آریزونا، ایالات متحده انجام دادند. یکی از اقدامات مهم آنها استفاده از سیستم موقعیت یابی جهانی و نیز خودرویی شناور برای اندازه‌گیری سرعت است. نتایج پژوهش نشان می‌داد که سرعت پیشروی حدود ۶٪ بهبود یافته، تعداد توقف حدود ۴٪ و مصرف سوخت ۱/۶ در صد کاهش یافته است. [Rakha et al. 2015].

ژیاوکینگ و همکاران در یک پژوهش با عنوان انتخاب مسیر برای هماهنگ‌سازی براساس وضعیت ترافیکی در کشور چین و شهر پکن به معرفی نوع جدیدی از هماهنگ‌سازی به صورت گردشی پرداختند. در واقع این بار برخلاف قبل مسیر هماهنگ‌شده، مستقیم نبوده و در برخی تقاطع‌ها براساس تقاضا حرکات گردشی به عنوان هماهنگ شده انتخاب می‌شود. تمرکز این پژوهش بر روی انتخاب بهینه ترین مسیر برای هماهنگ‌سازی بین هر مبدا و مقصدی است. از نرم افزار سینکرو استفاده شده است و نتایج نشان داد که وقتی حجم چپگرد هابی بالا باشد، هماهنگ‌سازی گردشی مفیدتر

## بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....

$$E = 100 B / 2C \quad (3)$$

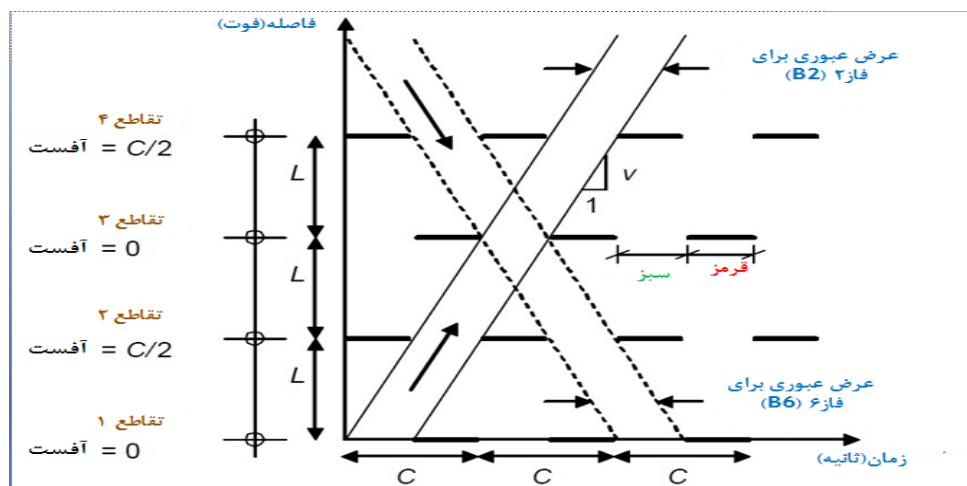
$E$ : کارایی سیستم هماهنگ چراغ‌های ترافیکی (درصد). در واقع کارایی نشان می‌دهد که چه مقدار از طول چرخه برای باند پیشروی در دسترس است. معیار دسترسی به عنوان بخشی از بازه زمانی سبز که قابل دسترسی است برای استفاده باند پیشروی تعریف می‌شود:

$$A = 100 B / (G_2 + G_6) \quad (4)$$

که  $A$  دسترسی سیستم هماهنگ چراغ‌ها بر حسب درصد،  $G_2$  طول سبز بحرانی فاز ۲ و  $G_6$  طول زمان سبز بحرانی فاز ۶ است. به عبارت دیگر میزان دسترسی توصیف می‌کند که آیا زمان‌های سبز فازهای هماهنگ شده به طور موثری برای پیشروی استفاده می‌شود یا خیر؟ دسترسی کم، نشان دهنده وجود تداخل در یک یا چند تقاطع است و اصلاح زمان آفست و یا توالی فاز چپ گرد در این موارد ممکن است مفید باشد. حدود این معیارها در مرجع بیان شده است. [Pratt and Zimmerman, 2009]

که در آن،  $C$  طول چرخه برحسب ثانیه،  $L$  طول قطعه بر حسب فوت و  $V$  سرعت پیشروی (مایل بر ساعت) است. البته برابری فاصله تقاطع‌ها، حالت ایده‌آل است، معمولاً این فاصله‌ها برابر نیست و بر عرض باند عبوری تأثیر می‌گذارد. تداخل لبه پایینی و لبه بالایی عرض باند عبوری و همچنین شرایط تقاطع بحرانی از جمله موارد قابل تأمل است که به منبع ارجاع داده می‌شود [Zimmerman, 2009].

در مورد معیارهای اندازه‌گیری کارایی، چندین روش متفاوت برای اندازه‌گیری کیفیت و کارایی طرح زمانبندی هماهنگ‌شده بکار می‌رود، مثل عرض باند پیشروی کلی، کارایی و دسترسی. عرض عبوری کلی برابر  $B = B_2 + B_6$  که  $B_2$  عرض عبوری فاز ۲ و  $B_6$  عرض عبوری فاز ۶ بر حسب ثانیه است. البته گاهی ممکن است از طریق افزایش طول چرخه‌ها عرض پیشروی نیز افزایش یابد، اما آن، باعث افزایش تاخیر کلی می‌شود، به همین دلیل بجای مقیاس عرض عبوری کلی از مقیاس کارایی رابطه (۳) و معیار دسترسی رابطه (۴) استفاده می‌شود، چون کارایی هر دو عامل عرض عبوری و طول چرخه را در نظر می‌گیرد:



شکل ۲. مفهوم عرض عبوری

شده و در صورت نیاز عملیات برنامه نویسی و محاسبات ریاضی مربوطه انجام شده و داده‌ها آماده‌ی ورود به نرم‌افزار شدند. حال نوبت ساخت مدل‌های شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار سینکرو و با استفاده از داده‌های برداشت شده است. سناریوهای مورد نظر اجرا و نتایج آن‌ها طبق خروجی‌های نرم افزار سینکرو<sup>۳</sup> سیم‌ترافیک<sup>۴</sup> بدست آورده شده و صحت نتایج بدست‌آمده از طریق انجام مطالعه اعتبار سنجی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. ساختار پژوهش در شکل (۴) ارائه شده است.

#### ۴-۱ معرفی نرم‌افزار

ابزار اصلی سنجش کارایی این روش مورد نظر در این پژوهش نرم‌افزار سینکرو است. نرم‌افزاری که ستایشی و همکاران در مطالعه‌ای تحت عنوان نرم‌افزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی با کاربرد ارزیابی شبکه حمل و نقل شهری به مقایسه آن با دیگر نرم‌افزارهای موجود در کشور ایران پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با توجه به تمامی جوانب، یکی از مناسب‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای شرایط کشور ایران، سینکرو خواهد بود [Setayeshi et al. 2012]. ظرفیت از روش دستورالعمل ICU استفاده می‌کند. در این روش، حجم جاری را با ظرفیت نهایی تقاطع مقایسه می‌کنند، همچنین از مطالب مربوط به دستورالعمل ظرفیت راه‌ها<sup>۵</sup> (HCM 2010) استفاده می‌نماید. این نرم‌افزار توانسته است باروشی ساده برای تحلیل ظرفیت تقاطع‌های چراغدار و بهینه کردن زمانبندی آنها زمینه‌ای مناسب را فراهم کند. محاسبات تاخیر یکی از بخشهای اساسی بهینه‌سازی هدف در سینکرو است. در این نرم‌افزار کاربر قادر است تاخیر را از دو روش بدست آورد. روش درصدی<sup>۶</sup> که بیشتر براساس فرمول‌های HCM استوار است و روش ویستر<sup>۷</sup> که طریقه محاسبه تاخیر در آن توسط فرمول پیشنهادی ویستر است.

#### ۴-۲ معرفی محدوده مورد مطالعه

تقاطع‌های مورد مطالعه در این پژوهش از میان همان ۲۳ مورد هوشمند مرکزی باتوجه به معیارهای مورد معامله انتخاب شده‌اند. مطالعه‌ی اصلی مربوط به خیابان شریانی خیام است که کاملاً در محدوده تجاری شهر قزوین واقع شده است. این راه شریانی مطابق شکل ۳ به طول تقریباً ۱۴۸۵ و دارای سه تقاطع از بالا دست عدل، خیام و شهرداری است.

در خصوص عرض عبوری، چند نکته مهم قابل ذکر است. اولاً این عرض برای هر جهت از حرکت متفاوت است. می‌بایست توجه داشت که اگر تقاطع یا تقاطع‌هایی از سیستم حذف یا اضافه شوند تغییرات گسترده‌ای ایجاد می‌شود. همچنین در شرایط فوق اشباع امکان بهبود وضعیت بسیار دشوارتر است. لازم به ذکر است طرحی که عرض باند عبوری بیشتری در اختیار می‌گذارد ممکن است مصرف سوخت کل شبکه را و تأخیر آن را افزایش دهد.

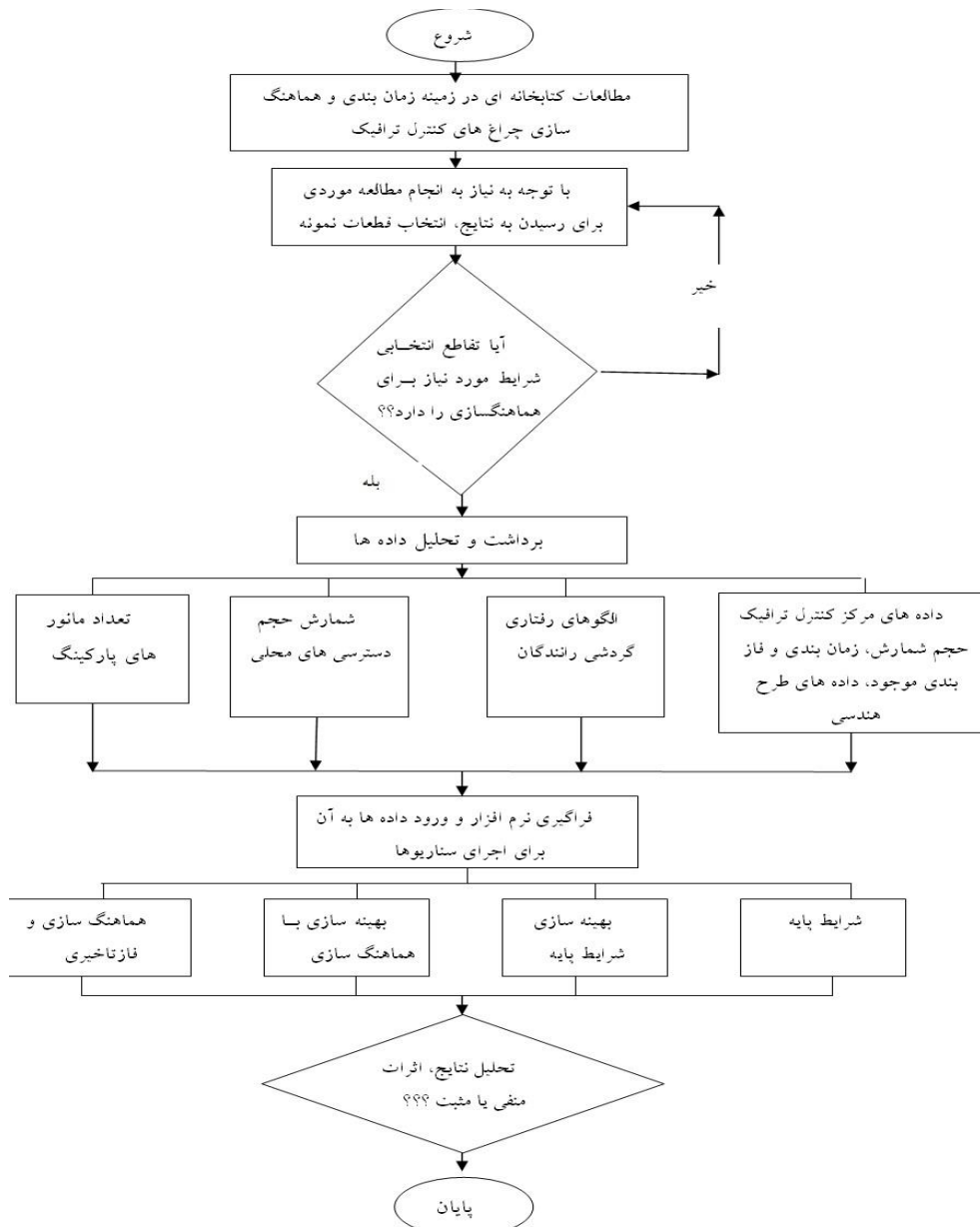
#### ۴. روش تحقیق

پژوهش حاضر یک تحقیق توصیفی - تحلیلی است که در طی آن مدل‌سازی شرایط واقعی به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیکی و بر اساس داده‌های بدست آمده از برداشت‌های میدانی انجام شده است. مطالعه میدانی بر روی تعدادی از تقاطع‌های شهر قزوین انجام شده است. لزوم انجام مطالعه میدانی برای مشاهده و بررسی روش هماهنگ‌سازی و نتایج آن از اصول مهم این پژوهش بوده است. برای انجام چنین مطالعه موردی نیاز به همکاری مرکز کنترل ترافیک و شهرداری شهر مربوطه است. تحت کنترل هوشمند مرکزی تقاطع‌های چراغ‌دار توسط مرکز کنترل ترافیک به صورت لحظه‌ای، زمان بندی و فزاینده کنترل و تغییرات ضروری به راحتی اعمال می‌شود. با توجه به مطالعات و ضوابط تقاطع‌های قابل هماهنگ سازی، دو دسته از تقاطعات نزدیک به هم بر روی شریانیهای شهر قزوین به عنوان مطالعه‌های پژوهشی انتخاب شدند که دسته اول مطالعه اصلی و دسته دوم مطالعه اعتبارسنجی نتایج مطالعه اول است. براساس نتایج طرح مطالعات جامع شهر قزوین در حال حاضر شهر قزوین دارای ۱۰۳ تقاطع مورد کنترل است که ۳۸ مورد آن به کمک چراغ کنترل ترافیک مدیریت می‌شوند. از این ۳۸ مورد، ۲۳ مورد به صورت هوشمند مرکزی، ۶ مورد زمان بندی ثابت و ۹ مورد به صورت هوشمند محلی کنترل می‌شوند. تقاطع‌های مورد مطالعه از میان ۲۳ تقاطع تحت کنترل هوشمند مرکزی انتخاب شدند. این تقاطع‌ها تحت سیستم یک پارچه نرم‌افزار اسکس<sup>۲</sup> مدیریت و کنترل می‌شوند. پس از تعیین تقاطع‌ها اقدام به برداشت داده‌های مورد نیاز مثل داده‌های طرح هندسی، داده‌های شمارشی حجم، الگوهای گردشی، زمان بندی‌های موجود و غیره شد. پس از جمع‌آوری تمامی اطلاعات مورد نیاز به تحلیل و دسته بندی آن‌ها پرداخته

بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه



شکل ۴: مفهوم عرض عبوری



#### ۴-۳ جمع‌آوری داده‌ها

برای بررسی اثرات این روش هماهنگ‌سازی و همچنین استفاده از نرم‌افزار یک سری داده‌های مختلف به شرح زیر نیاز وجود دارد: داده‌های طرح هندسی، داده‌های حجم‌های ترافیکی و داده‌های زمان‌بندی و فازبندی. داده‌های طرح هندسی - این داده‌ها شامل تعداد، عرض، شیب و طول خطوط رویکردهای موجود، نوع ناحیه، طول انباره مسیره‌های گردش، شعاع جزیره‌های گردش و خطوط نزدیک به تقاطع است. بخش عمده‌ای از این اطلاعات از طریق آخرین نسخه بروز رسانی شده نقشه‌ی اتوکلد شهری قزوین که توسط مرکز کنترل ترافیک در اختیار محقق قرار گرفت بدست آمد. موارد باقی‌مانده نیز با برداشت میدانی در سطح تقاطع‌ها کامل شد. داده‌های زمان‌بندی و فازبندی - این داده‌ها شامل ویژگی‌های زمان‌بندی فازبندی موجود و فعلی مثل نوع کنترل چراغ، سهم زمانی رویکرد‌ها، تعداد فازهای تقاطع، نوع فازهای گردش، کاربری خطوط تقاطع، نوع شناساگرها و محل قرارگیری آنها، حداقل و حداکثر طول چرخه‌ها و زمان سبز، زمان زرد و تمام قرمز فازها، حالت بازخوانی فازها و نوع توالی فازها است. از آنجا که تقاطعات مورد مطالعه جز تقاطعات هوشمند مرکزی تحت کنترل نرم‌افزار اسکتس مرکز کنترل ترافیک است، بسیاری از موارد ذکر شده فوق توسط خروجی‌های نرم‌افزار ذکر شده برای بازه زمانی آبان ماه ۹۴ در اختیار پژوهشگر قرار گرفته است. تمامی تقاطع‌های مورد مطالعه به صورت هوشمند مرکزی کنترل می‌شوند. عمدتاً دارای دو فاز و گاهی سه فاز هستند. در حال حاضر تمامی گردش به چپ‌ها، به صورت مجاز اجرا می‌شوند و گردش به راست نیز در زمان چراغ قرمز آزاد است. شناساگرهای این تقاطعات از نوع القایی بوده و فاصله آنها از خط ایست تقاطع صفر و طول آنها ۲/۵ متر است. طبق برداشت‌های مرکز کنترل ترافیک، حجم عابری بین ۱۰۰ تا ۴۰۰

نفر در ساعت است (جدول ۱). داده‌های شمارشی جریان ترافیک - این داده‌ها شامل حجم جریان ترافیک عبوری از هر کدام از رویکردهای تقاطع‌ها، نوع الگوی مانورهای گردش و مستقیم رانندگان، مقدار حجم ورودی و خروجی از دسترسی‌های محلی بین تقاطع‌ها و تعداد مانورهای ورود و خروج به فضای پارک حاشیه‌ای است. حجم شمارش جریان ترافیک توسط خروجی‌های نرم‌افزار اسکتس برای بازه آبان ماه ۱۳۹۴ مربوط به تقاطع‌های مورد مطالعه با مساعدت معاونت کنترل ترافیک در اختیار پژوهشگر قرار گرفت. این داده‌ها میزان حجم ترافیک ۲۴ ساعته در بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای را برای ۳۰ روز کامل از آبان ماه را ارائه می‌دهند. محاسبات ساعت اوج برای احجام ترافیکی به ازای هر رویکرد هماهنگ‌شده یا نشده و هر تقاطع آغاز گردید. این محاسبات برای تمامی ۳۰ روز آبان ماه جز به جز پیاده شده است. مجموع حجم ساعتی برای هر ۴ بازه ۱۵ دقیقه بدست آمده تا ساعت اوج محاسبه شود که نمونه محاسبات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

این خروجی‌های نرم‌افزار اسکتس شامل کل حجم عبوری هر کدام از رویکردهای تقاطع بودند و برای رسیدن به تفکیک سهم هر کدام از حرکات چپ گرد (دور برگردان)، راست گرد و مستقیم و همچنین درصد وسیله نقلیه سنگین باید از آنالیز تصویر کمک گرفت. به این صورت که برای بازه‌ی یک ساعته اوج از تقاطع‌های مورد مطالعه برداشت فیلم صورت پذیرد. برای این کار باید دوربین دیجیتال مورد استفاده کرد و این دوربین در یک مکان مناسب جانمایی شود تا علاوه بر اینکه ایجاد مزاحمت نداشته باشد، بر تمامی رویکردهای تقاطع و خودروهای عبوری مسلط باشد، با همکاری و هماهنگی مرکز کنترل ترافیک شهرداری قزوین اقدام به برداشت فیلم‌ها از تقاطع‌های مربوط در اردیبهشت ۱۳۹۵ صورت گرفت که در ادامه تصاویری از آن در شکل (۵) و نتایج در جداول (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۱. نمونه‌ای از داده‌های میدانی برداشت شده

	۶:۰۰	۷:۰۰	۸:۰۰	۱۷:۰۰	۱۸:۰۰	۱۹:۰۰
۰:۱۵	۲۳۰	۲۷۶	۳۶۹	۲۸	۷۴	۲۶۷
۰:۳۰	۲۲۰	۳۲۲	۳۶۶	۲۶	۸۷	۳۴۳
۰:۴۵	۲۱۶	۳۶۴	۳۸۷	۳۷	۱۱۰	۳۹۰
۱:۰۰	۲۴۲	۳۸۳	۳۷۲	۶۱	۲۱۸	۳۷۰
مجموع	۹۰۸	۱۳۴۵	۱۴۹۴	۱۵۲	۴۸۹	۱۳۷۰
	۹۵۴	۱۴۳۸	۱۱۵۳	۱۹۸	۶۸۲	۱۱۰۳
احجام	۱۰۵۶	۱۴۸۲	۸۱۳	۲۵۹	۹۳۸	۷۶۰
ساعتی	۱۲۰۴	۱۵۰۵	۴۶۳	۳۳۲	۱۲۱۸	۳۷۰

بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش ..... .



شکل ۵. برداشت تصاویر ویدئویی از حرکات خودروها در سطح تقاطع‌ها

جدول ۲. اطلاعات طرح هندسی و زمانبندی مطالعه اصلی

تقاطع	طرح فازبندی	حداکثر طول چرخه (ثانیه)	حد اقل طول ل چرخه (ثانیه)	نوع ناحیه شهری	رویکرد	تعداد حرکات	تعداد خطوط	طول رویکرد (بازو) متصل به تقاطع (متر)	خط چپگرد انحصاری	شماره شناساگر	زمان سبز (ثانیه)	فاز	
عدل (فوق اشباع)	فازی ۲	۱۲۰	۳۰	تجاری	شمالی (خیام)	۴	۳	۵۷۵	ندارد	۴ و ۵ و ۶	۵۰	B	
					شرقی (عدل)	۳	۳	۱۵۰	دارد	۷ و ۸ و ۹	۷۰	A	
					جنوبی (خیام)	-	۲	۳۵۰	-	-	-	-	
خیام (فوق اشباع)	فازی ۲	۱۱۰	۳۰	تجاری	غربی (عدل)	۳	۳	۲۰۰	دارد	۱ و ۲ و ۳	۷۰	A	
					شمالی (خیام)	۲	۲	۳۵۰	ندارد	۱ و ۲ و ۳	۶۰	B	
					شرقی (بوعلی)	۲	۲	۲۸۵	ندارد	۴ و ۵ و ۶	۵۰	A	
شهرداری	فازی ۲	۱۱۰	۳۰	تجاری	جنوبی (خیام)	-	-	۳۱۰	ندارد	۴ و ۵ و ۶	۷۰	B	
					غربی (بوعلی)	-	-	۲۲۵	-	-	-	-	
					شمالی (خیام)	۳	۳	۳۱۰	ندارد	۴ و ۵ و ۶	۷۰	B	
					شرقی (شهرداری)	-	-	۳۷۵	-	-	-	-	
ی	مسکون	۳۰	۳۰	جنوبی (خیام)	-	-	۲۵۵	-	-	-	-	-	-
				غربی (شهرداری)	۲	۲	۲۳۵	ندارد	۱ و ۲ و ۳	۴۰	A		

جدول ۳. اعمال نتایج پردازش تصویر بر روی خروجی‌های حجم نرم افزار (۲شنبه ۱۸ آبان)

تقاطع	رویکرد	حرکت	حجم تردد (خودرو بر ساعت)	درصد وسیله سنگین	ضریب ساعت اوج (PHF)
عدل	شمالی	راستگرد	۱۵۷	۰	۰,۹
		مستقیم	۳۵۰	۰	۰,۹
		چپگرد	۸۲	۰	۰,۹
	شرقی	دور برگردان	۶۰	۰	۰,۹
		راستگرد	۱۸۰	۱	۰,۸۴
		مستقیم	۶۰۱	۱	۰,۸۴
	غربی	چپگرد	۲۰۷	۱	۰,۸۴
		راستگرد	۴۶۷	۱	۰,۹۲
		مستقیم	۶۷۶	۱	۰,۹۱

۰,۹۲	۱	۹۹	چپگرد	
		-		جنوبی
۰,۹۱	۰	۲۱۱	راستگرد	
۰,۹۱	۰	۶۶۴	مستقیم	شمالی
۰,۸۹	۱	۴۶۸	مستقیم	شرقی
۰,۸۸	۱	۲۰۱	چپگرد	خیام
		-		جنوبی
		-		غربی
۰,۸۱	۰	۱۱۷	راستگرد	
۰,۸۱	۰	۴۴۱	مستقیم	شمالی
۰,۸۱	۰	۱۶۷	چپگرد	
۰,۸۷	۱	۸۳	راستگرد	شهرداری
۰,۸۷	۱	۱۷۸	مستقیم	غربی
		-		جنوبی
		-		شرقی

#### ۴-۴ محاسبات روش عرض عبوری

با توجه به مطالب گفته شده، معادله ۵ تا ۷ به ترتیب نحوه محاسبه شاخص زوجیت (قابلیت هماهنگ شدن)، مقدار این شاخص در تقاطع عدل تا خیام و تقاطع خیام تا شهرداری را نشان می‌دهد.

$$CI = V/L \quad (۵)$$

$$900/1150 = 0.78 \quad (۶)$$

$$725/1020 = 0.71 \quad (۷)$$

معادله ۸، طول چرخه درحالت پیشروی عرض عبوری و معادله ۹ و ۱۰ به ترتیب مقدار این شاخص را در تقاطع‌های عدل تا خیام و خیام تا شهرداری به ترتیب نشان می‌دهند.

$$C = 2 * \frac{L}{1.47V} \quad (۸)$$

$$C = 2 * 1150/1.47 * 20 = 150 \quad (۹)$$

$$C = 2 * 980/1.47 * 20 = 70 \quad (۱۰)$$

که در آن، C: طول چرخه بر حسب ثانیه، L: طول قطعه بر حسب فوت و V: سرعت پیشروی (مایل بر ساعت) است.

معادله ۱۱ و ۱۲ به ترتیب چگونگی اندازه‌گیری معیارهای کیفیت پیشروی عرض عبوری و کارایی عرض عبوری محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

$$E = 100 B/C \quad (۱۱)$$

$$E = 100^{37}/110 = 34 \quad (۱۲)$$

در ادامه، معادله ۱۳ و ۱۴ نحوه محاسبه دسترسی عرض عبوری و مقدار این شاخص برای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

$$A = 100 B/(G_2 + G_6) \quad (۱۳)$$

$$A = 100^{37}/(0 + 50) = 73 \quad (۱۴)$$

که در آنها A: دسترسی سیستم هماهنگ چراغ‌ها بر حسب در صد، G<sub>2</sub>: طول سبز بحرانی فاز ۲ و G<sub>6</sub>: طول زمان سبز بحرانی فاز ۶ است.

#### ۵. سناریوها و نتایج

با کالیبره نمودن نرم‌افزار براساس دستورالعمل کالیبراسیون به کمک داده‌های مربوط به کشور ایران و پس از ساخت مدل‌های شبیه‌سازی شکل (۶) در نرم‌افزار سینکرو با استفاده از اطلاعات

## بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....

ایجاد موج‌سبزی‌شروی ۴- بهینه‌سازی با کنترل هماهنگ به همراه استفاده از فازبندی تاخیری. این سناریوها در نرم‌افزار پیاده شده و در جداول ۴ تا ۶ نتایج شبیه‌سازی و اجرای سناریوهای مدنظر برای مطالعه‌ی اصلی محور خیام برای ساعت اوج و شرایط فوق‌اشباع ارائه شده است. مقادیر اثرات حاصل از اجرای سناریوها بر شاخص‌های کارایی در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

جمع‌آوری شده، اقدام به اجرای سناریوها و دریافت خروجی‌ها می‌شود.

پس از ورود اطلاعات اولیه به نرم‌افزار و ساخت محیط مدل و ویژگی‌های هندسی و ترافیکی آن نوبت به پیاده‌سازی و تحلیل سناریوهای موردنظر می‌رسد. در چارچوب این پژوهش چهار سناریوی اصلی وجود دارد: ۱- شرایط پایه (وضعیت فعلی و موجود) ۲- بهینه‌سازی شرایط موجود بدون هماهنگ‌سازی (منفرد یا شبکه‌ای) ۳- بهینه‌سازی با کنترل هماهنگ تقاطع‌ها و



شکل ۶. نمونه‌ای از مدل ساخته شده

جدول ۴. خروجی نرم‌افزار سینکرو برای مطالعه اصلی در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج

سناریو	تاخیر خودروها (ثانیه بر خودرو)	تاخیر کل (ساعت)	تعداد توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفر کل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تولید آلاینده‌ها کیلوگرم	شاخص عملکردی (PI)
۱	۲۸	۹۰	۴۴۸۷	۱۶	۱۳۷	۵۵۹	۱۴,۸۱	۱۰۸,۸
۲	۲۵	۸۲	۴۳۱۷	۱۷	۱۲۹	۵۳۴	۱۴,۱۴	۹۴,۴
۳	۲۴	۷۹	۴۲۲۲	۱۸	۱۲۵	۵۲۲	۱۳,۸۱	۹۰,۵
۴	۳۰	۹۸	۴۴۷۶	۱۵	۱۴۴	۵۸۰	۱۵,۳۶	۱۱۰,۳

جدول ۵. خروجی نرم‌افزار سینکرو برای رویکرد (خیام) هماهنگ‌شده مطالعه اصلی در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج

سناریو	تاخیر خودروها (ثانیه بر خودرو)	تاخیر کل (ساعت)	تعداد توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفر کل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تولید آلاینده‌ها کیلوگرم	شاخص عملکردی (PI)
۱	۱۸	۴۱	۱۹۰۳	۱۷	۶۴	۲۵۸	۶,۸۳	۴۶,۴
۲	۱۷	۳۸	۱۸۳۵	۱۸	۶۰	۲۴۸	۶,۴۶	۴۳,۱
۳	۱۶	۳۵	۱۷۴۱	۱۹	۵۸	۲۳۸	۶,۲۱	۴۰,۱
۴	۱۵	۳۴	۱۹۷۴	۱۹	۵۷	۲۴۰	۶,۲۶	۳۹,۷

جدول ۶. خروجی شبیه‌ساز سیم‌ترافیک برای مطالعه اصلی در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج

سناریو	زمان سفرکل (ساعت)	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سوخت مصرفی (لیتر)	شاخص تاخیر عملکردی (ساعت)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۱	۱۴۹,۵	۶۹,۲	۴۲۰۷	۳۱۵,۱	۶۴,۳	۲۰۱
۲	۱۴۳	۶۵,۲	۴۱۳۸	۳۰۴,۸	۶۱,۵	۱۷۲
۳	۱۲۴,۶	۴۴,۹	۳۹۸۷	۲۹۰,۲	۴۳,۹	۱۱۳
۴	۱۳۳,۵	۵۲,۹	۴۹۲۹	۲۹۶,۶	۵۱,۹	۱۷۹

جدول ۷. اثرات اجرای سناریوها براساس نتایج سینکرو برای کل شبکه (اعداد براساس درصد)

سناریو	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفرکل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۲	۸-کاهش	۴-کاهش	۷-افزایش	۵-کاهش	۴-کاهش	۲۵-کاهش
۳	۱۰-کاهش	۶-کاهش	۱۲-افزایش	۸-کاهش	۷-کاهش	۳۵-کاهش
۴	۷-افزایش	۱-کاهش	۷-کاهش	۳-افزایش	۴-افزایش	۳۰-کاهش

جدول ۸. اثرات اجرای سناریوها براساس نتایج سینکرو برای رویکرد شریانی (اعداد براساس درصد)

سناریو	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفرکل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۲	۸-کاهش	۴-کاهش	۷-افزایش	۵-کاهش	۴-کاهش	۲۵-کاهش
۳	۱۰-کاهش	۶-کاهش	۱۲-افزایش	۸-کاهش	۷-کاهش	۳۵-کاهش
۴	۹-کاهش	۱-کاهش	۱۲-افزایش	۹-کاهش	۶-کاهش	۲۰-کاهش

### ۱-۵ یافته‌ها

**شرایط پایه** - اولین سناریو متعلق به مدل‌سازی و تحلیل شرایط ترافیکی وضع طرح هندسی و زمانبندی موجود است. هدف اصلی از این کار مقایسه نتایج حاصل از ایجاد هرگونه تغییر در شرایط موجود فعلی و ارزیابی اثرات آن تغییر با توجه به شاخص‌های کارایی است. علاوه بر این وضعیت فعلی و حاضر شبکه تقاطع‌ها و شاخص‌های کیفیت آن‌ها مشخص می‌شود. برای نمونه چند تقاطع مانند عدل دچار تاخیر بیش از حد دریک یا چند رویکرد و حرکات آن رویکرد است که با طرح‌های بهینه‌سازی و هماهنگ‌سازی بهبود می‌یابد.

**بهینه‌سازی شبکه‌ای ساده** - در چهارچوب پژوهش حاضر این سناریو تنها برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اجرای

روش عرض عبوری و فازبندی تاخیری گنجانده شده است. براساس خروجی‌های نرم‌افزار سینکرو بهینه‌سازی شبکه‌ای همواره شرایط تقاطع‌های مورد مطالعه را بهبود می‌بخشد، که این بهبود در ساعات اوج نسبت به کنترل هماهنگ مقداری کمتر خواهد بود. نرم‌افزار خرد نگر سیم ترافیک در اکثر موارد اجرای بهینه‌سازی شبکه‌ای به روش HCM و درصدی را باعث بهبود شرایط گزارش کرده است، اما این مقدار بهبود کمتر از نتایج نرم‌افزار سینکرو بوده و البته بازم طرح هماهنگ‌سازی را پیشنهاد می‌دهد. در ساعات غیراوج و حالت زیراشباع هردوی نرم افزارها بر ارجحیت و کارایی اجرای بهینه‌سازی متداول شبکه‌ای نسبت به کنترل هماهنگ تاکید کرده‌اند.

## بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....

برخودروها می‌گردد. از دلایل عمده آن، نبود پیش شرط‌های ضروری برای فراهم شدن بستر مناسب برای هماهنگ‌سازی تقاطعات متوالی است. در این حالت زیر اشباع بهترین اقدام همان بهینه‌سازی شبکه‌ای است که بین ۷ تا ۱۰ درصد معیارهای کارایی را بهبود می‌بخشد. در ادامه برای خروجی‌های نرم‌افزار سینکرو نحوه تغییر تاخیر کل شبکه و نیز تاخیر وارد بر خودروهای رویکرد هماهنگ شده به ازای اجرای سناریوها در شکل ۷، همچنین مقایسه خروجی‌های نرم‌افزار خردنگر و کلان‌نگر در ساعت اوج در شکل ۸ ارایه شده اند.

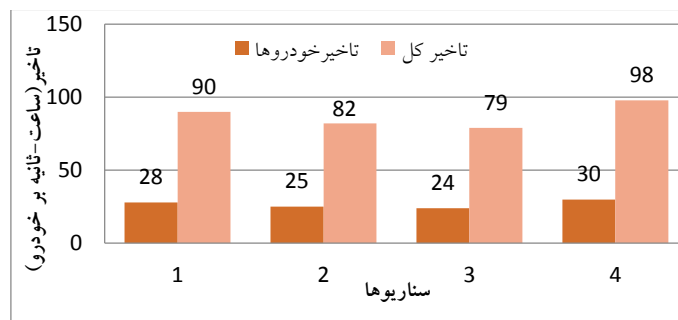
### ۶. اعتبارسنجی نتایج

برای تایید صحت نتایج بدست‌آمده باید یک مطالعه اعتبارسنجی انجام شود. به همین منظور همانطور که پیش از این بیان شد، از میان تقاطع‌های تحت کنترل سیستم هوشمند مرکزی سیستم SCATS چهار تقاطع مجاور هم واقع شده بروی شریانی بوعلی انتخاب شده‌اند. مطالعه‌ی اعتبارسنجی مرتبط با راه شریانی بوعلی در محدوده کاربری تجاری-مسکونی است. مطابق شکل ۹ خیابان بوعلی دارای طول ۱۵۲۵ و دارای چهار تقاطع به ترتیبی از بالا دست خیابان ملت، خیام، فردوسی و نادری است. سایر اطلاعات مربوط به مطالعه اعتبارسنجی. همانند مطالعه اصلی تمامی مراحل قبل مانند برداشت داده‌ها، انجام محاسبات بروی آن‌ها، ساخت مدل نرم افزاری، اجرای سناریوها و درنهایت دریافت نتایج و تحلیل آن‌ها برای مطالعه‌ی اعتبارسنجی نیز انجام و خروجی نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار خردنگر و کلان‌نگر برای مطالعه اعتبارسنجی بر روی محور بوعلی در ساعت اوج در جداول ۹ و ۱۰ و نیز نتایج تغییرات شاخص‌های کارایی برای مطالعه اعتبارسنجی به شرح جداول ۱۱ و ۱۲ است.

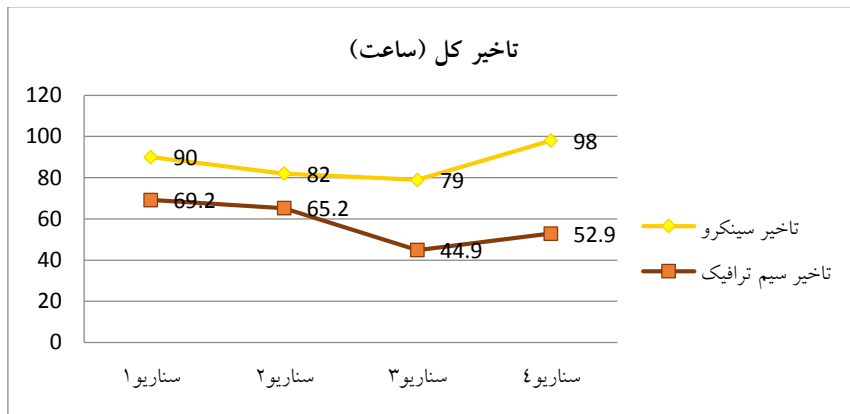
اجرای کنترل هماهنگ- مطابق نتایج هردوی نرم‌افزارها در حالت فوق اشباع و برای ساعت اوج اجرای طرح کنترل هماهنگ تقاطع‌های متوالی واقع بر شریانی به روش عرض عبوری وانجام بهینه‌سازی شبکه‌ای طول‌چرخه و زمان آفست به روش‌های HCM و درصدی معیارهای کیفیت را به میزان قابل توجهی بهبود خواهند بخشید. با توجه به نتایج نرم‌افزار سینکرو اجرای طرح هماهنگ‌سازی تاخیر کل را به میزان ۱۰ درصد، توقف را ۶ درصد، مصرف سوخت را ۷ درصد و میزان تولید گازهای گلخانه‌ای آلاینده را ۸ درصد کاهش می‌دهد. طبق نتایج نرم‌افزار شبیه‌سازی سیم‌ترافیک، اجرای بهینه‌سازی زمانبندی با کنترل هماهنگ به روش عرض عبوری در ساعت اوج مقدار تاخیر کل را به میزان ۱۹ درصد، توقف را ۹ درصد مصرف سوخت ۱۰ درصد و از همه مهم‌تر مقدار پس‌زدگی طول صف را ۲۱ درصد کاهش خواهد داد.

اجرای فازبندی تاخیری در کنار طرح هماهنگ- برای نرم‌افزار سینکرو مطابق خروجی‌ها اجرای فازبندی تاخیری، مقادیر معیارهای کارایی شبکه از جمله تاخیر، توقف، مصرف سوخت و ... را بطور متوسط بین ۱ تا ۵ درصد وخیم‌تر کرده است. در مقابل براساس نتایج تحلیل خردنگر نرم‌افزار سیم‌ترافیک این اقدام باعث بهبود شرایط ترافیکی خواهد شد. برای مثال زمان سفر ۶ درصد، تاخیر ۷ درصد، مصرف سوخت ۶ درصد و طول صف ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. البته باید اشاره کرد که شرایط لزوم اجرای فازگردشی تاخیری در محل تقاطع باید فراهم باشد، چه از نظر طرح هندسی و نسبت حجم‌گردشی به ظرفیت نیاز به فاز تاخیری باشد.

مقایسه شرایط فوق و زیر اشباع- به طور کلی و براساس نتایج هردوی نرم‌افزارها برای شرایط زیر اشباع برخلاف موارد ذکر شده در فوق اجرای بهینه‌سازی با کنترل هماهنگ و اجرای فازبندی تاخیری موجب افزایش تاخیر و توقف وارد



شکل ۷. مقایسه خروجی سینکرو برای تاخیر کل و تاخیر وارد بر خودروها از اجرای سناریوها در ساعت اوج



شکل ۸. مقایسه خروجی‌های نرم‌افزار خردنگر و کلاننگر



شکل ۹. محدوده مورد مطالعه جهت اعتبارسنجی

جدول ۹. خروجی نرم‌افزار سینکرو برای مطالعه اعتبارسنجی در شرایط فوق اشباع ساعت اوج

سناریو	تاخیر خودرو (ثانیه بر خودرو)		تاخیر کل (ساعت)		کل توقف		سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	
	کل شبکه	شریانی هماهنگ	کل	شریانی هماهنگ	کل	شریانی هماهنگ	کل شبکه	شریانی هماهنگ
۱	۱۱۷	۱۰۱	۲۴۱	۲۰۷۷	۵۲۰۳	۲۰۷۷	۶	۸
۲	۱۰۱	۸۱	۲۰۴	۲۱۰۶	۵۱۰۱	۲۱۰۶	۹	۹
۳	۱۰۰	۷۸	۲۳۶	۲۰۶۸	۵۰۹۵	۲۰۶۸	۱۰	۹
۴	۸۸	۷۰	۱۹۹	۱۸۱۲	۴۹۹۱	۱۸۱۲	۱۱	۱۰

سناریو	زمان سفر (ساعت)		مصرف سوخت (لیتر)		تولید آلاینده‌ها (کیلوگرم)		شاخص عملکردی	
	کل شبکه	شریانی هماهنگ	کل شبکه	شریانی هماهنگ	کل شبکه	شریانی هماهنگ	کل شبکه	شریانی هماهنگ
۱	۲۶۹	۹۰	۱۰۰۱	۳۰۱	۲۵,۲۷	۱۰,۹	۲۵۰	۱۰۱
۲	۲۵۱	۷۸	۸۹۹	۲۸۹	۲۳,۵۸	۷,۷۶	۲۱۹,۲	۶۸,۵
۳	۲۵۰	۷۶	۸۸۹	۲۷۲	۲۳,۲۶	۹,۲۶	۲۱۷,۳	۹۰,۶
۴	۲۴۷	۷۱	۸۷۴	۲۶۵	۲۰,۵۴	۶,۲۹	۱۹۳,۱	۴۷,۴

## بررسی اثرات هماهنگ‌سازی زمانبندی تقاطع‌های چراغدار به روش .....

جدول ۱۰. خروجی شبیه‌ساز سیم‌ترافیک برای مطالعه اعتبارسنجی در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج

سناریو	زمان سفرکل (ساعت)	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سوخت مصرفی (لیتر)	شاخص تاخیر عملکردی (ساعت)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۱	۱۴۱٫۸	۱۵۹٫۱	۵۰۰۱	۳۱۱٫۴	۹۹	۰
۲	۱۳۳٫۱	۱۵۷	۵۶۴۷	۳۰۳٫۲	۷۷٫۷	۰
۳	۱۲۷٫۳	۱۴۳٫۲	۵۰۴۸	۲۹۰	۷۵	۰
۴	۱۱۰٫۹	۱۲۷٫۹	۴۶۲۲	۲۸۵	۷۴	۰

جدول ۱۱. اثرات اجرای سناریوها براساس نتایج سینکرو برای کل شبکه (اعداد براساس درصد)

سناریو	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفرکل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۲	۱۲-کاهش	۲-کاهش	۱۵-افزایش	۷-کاهش	۸-کاهش	ندارد
۳	۱۱-کاهش	۳-کاهش	۱۵-افزایش	۱۰-کاهش	۸-کاهش	ندارد
۴	۱۳-کاهش	۴-کاهش	۱۹-افزایش	۱۵-کاهش	۱۰-کاهش	ندارد

جدول ۱۲. اثرات اجرای سناریوها براساس نتایج سینکرو برای رویکرد شریانی (اعداد براساس درصد)

سناریو	تاخیر کل (ساعت)	تعداد کل توقف‌ها	سرعت متوسط (کیلومتر بر ساعت)	زمان سفرکل (ساعت)	سوخت مصرفی (لیتر)	تعداد خودروی پس‌زده در طول صف
۲	۵-کاهش	۵-کاهش	۲۰-افزایش	۱۳-کاهش	۴-کاهش	ندارد
۳	۶-کاهش	۶-کاهش	۲۰-افزایش	۱۵-کاهش	۷-کاهش	ندارد
۴	۷-کاهش	۱۲-کاهش	۲۵-افزایش	۱۹-کاهش	۱۲-کاهش	ندارد

## ۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات بهینه‌سازی زمانبندی از طریق هماهنگ‌سازی تقاطع‌ها به کمک انجام مطالعه میدانی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت در شرایط فوق‌اشباع ساعت‌اوج بهینه‌سازی از طریق کنترل هماهنگ تقاطع‌ها به روش عرض‌عبوری، شاخص‌های کارایی را بهبود می‌بخشد. میزان این بهبود حتی از بهینه‌سازی متداول شبکه‌ای نیز بیشتر بوده و برای مثال تاخیر کل ۱۰ درصد، توقف کل ۶ درصد، سرعت متوسط ۱۲ درصد، زمان سفر ۸ درصد، سوخت مصرفی ۷ درصد و طول صف ۲۵ درصد بهبود می‌یابد.

اثرات اجرای فازگردشی تاخیری درحالت هماهنگ وابستگی شدیدی بوجود شرایط مربوط به فازبندی تاخیری

ازجمله: حجم بالای حرکت چپگرد و میزان حجم تداخلی و شرایط طرح هندسی دارد. اگر شرایط اجرای فاز تاخیری فراهم باشد، اثرات مطلوبی بر شاخص‌های کارایی خواهد گذاشت و برای مطالعه اصلی عرض‌عبوری را از ۴۵ به ۵۸ ثانیه و مطالعه اعتبارسنجی از ۳۱ به ۳۷ ثانیه افزایش خواهد داد. در شرایط زیراشباع با توجه به فراهم نبودن ویژگیهای ضروری برای هماهنگ‌سازی از جمله حجم بالای شریانی، اجرای کنترل هماهنگ اثرات نامطلوبی داشته و بهترین کار همان بهینه‌سازی شبکه‌ای متداول است تا شاخص‌های کارایی شبکه بهبود یابد.



## ۸. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌گردد که معیارهای کارایی به دست آمده از طریق نرم‌افزار شبیه‌ساز خردنگر، با مقادیر میدانی و همچنین سایر روش‌های محاسباتی تأخیر نظیر محاسبات وبستر و سایر روش‌ها که به تفصیل در کتاب دستورات عمل ظرفیت راه‌های آمریکا ذکر شده، مقایسه گردد تا دقت نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و همچنین قابلیت کاربرد آنها براساس شرایط ترافیکی ایران، مشخص شود.

## ۹. سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری معاونت محترم حمل و نقل و ترافیک شهر قزوین و مرکز کنترل ترافیک شهر قزوین صورت پذیرفته و نویسندگان از حمایت‌های مستقیم و مستمر آقایان دکتر میزانی و مهندس رشوند، سپاسگزاری می‌کنند.

## ۱۰. پی‌نوشت‌ها

- 1-Development of a traffic signal operation handbook
- 2- Scats
- 3-Synchro
- 4-SimTraffic
- 5-Highway capacity Manual
- 6-Percentile
- 7-Webster

## ۱۱. مراجع

- ستایشی، صابر، رحیم‌اف، کامران، افندی‌زاده زرگری، شهریار و ستایشی، سعید (۱۳۹۱) "نرم‌افزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی با کارکرد ارزیابی شبکه حمل و نقل شهری"، یازدهمین کنفرانس سیستم‌های هوشمند ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران.

- شرکت مهندسی آتیه ساز (۱۳۹۰) "طرح مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک مجموعه شهری قزوین"، مرکز کنترل ترافیک شهرداری، جلد اول، فصل سوم، ص ۲۲، ایران، قزوین.

- علیقیان، مهدی و نادری، منصوره (۱۳۹۵) "کاهش مصرف سوخت برای مسئله مسیریابی خودرو با توجه به تراکم ترافیک شهری (مطالعه موردی: یک شرکت توزیع در اصفهان)" فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۷ سال هفتم، شماره ۳، ص ۴۹۹-۵۲۲.

-کالیبره نمودن نرم‌افزارهای مهندسی ترافیک براساس شرایط شهر تهران (۱۳۹۰) "مروری بر عملیات کالیبراسیون"، جلد پنجم، ایران، تهران.

-Bonneson, J., Pratt, M. and Zimmerman, K. (2009) "Development of a traffic signal operations handbook", (No. FHWA/TX-09/0-5629-1), Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.

-Bonneson, J. A., Sunkari, S. R. and Pratt, M. P. (2009) "Traffic signal operations handbook", (No. FHWA/TX-09/0-5629-P1), Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.

-Cesme, B. and Furth, P. G. (2014) "Self-organizing traffic signals using secondary extension and dynamic coordination", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 48, pp.1-15.

-Chen, X., Zhang, Y. and Chen, X. (2012) "Traffic design of effective coordination among the time, space, flow", ICLEM 2012: Logistics for Sustained Economic Development—Technology and Management for Efficiency, pp. 342-347.

-Ji, Y., Hu, B., Hill, G., Guo, W., Blythe, P. and Gao, L. (2016) "Signal coordination scheme based on traffic emission", IET

-افندی‌زاده زرگری، شهریار، حاج محمدی، هاجر و دهقانی، نازلی (۱۳۹۱) "هماهنگ سازی بهینه کنترل چراغها در معابر شهری فوق اشباع و زیراشباع"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، دهمین، ایران، تهران.

-رحیمی، امیرمسعود، باقری، سعید رامتین، دزفولیان شهنی، رضا و مظاهری، آرش (۱۳۹۵) "ارزیابی استفاده از تقاطع غیر متعارف برای بهبود جریان ترافیک در راه‌های برون شهری"، مجله پژوهشنامه حمل و نقل، سال ۱۳، شماره ۲، ص ۱۱۵-۱۲۸.

Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1727, pp.42-51.

-Roess, R. P., Prassas, E. S. and McShane, W. R. (2011) "Traffic engineering", Forth edition, Pearson Education International.

-TRB (2010) "Highway capacity manual", National Research Council, Washington, D.C.

-Waterman, R. M., Makuch, M. F., James, P. L. H., Cloutier, M. J., Palmer, B. A. S. G. R., Fatu, P. N. A., ... and Bongiorno, A. B. (2014) "Traffic control signal design manual., Connecticut Department of Transportation.

-Xiaoqing, D., Honghui, D. and Shihong, H. (2014, May) "A route-choice method based on zone traffic signal coordination control", In Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese, pp. 3921-3926, IEEE.

-Zhang, L., Song, Z., Tang, X. and Wang, D. (2016) "Signal coordination models for long arterials and grid networks", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 71, pp. 215-230.

Intelligent Transport Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 89-96.

-Koonce, P., Rodegerdts, L., Lee, K., Quayle, S., Beard, S., Braud, C. and Urbanik, T. (2008) "Traffic signal timing manual (No. FHWA-HOP-08-024).

-Li, Z., Shahidehpour, M., Bahramirad, S. and Khodaei, A. (2017) "Optimizing traffic signal settings in smart cities", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2382-2393.

-Nyantakyi, E. K., Adams, C. A., Borkloe, J. K. and Pobee, D. (2013) "Synchronization of signalised intersections: A case study of three major intersections on the 24th February Road, Kumasi, Ghana", International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 3, No 4, pp.2566-2590.

-Rakha, H., Medina, A., Sin, H., Dion, F., Van Aerde, M. and Jenq, J. (2000) "Traffic signal coordination across jurisdictional boundaries: Field evaluation of efficiency, energy, environmental, and safety impacts", Transportation Research

## امیرمسعود رحیمی، سعید طاهری

امیرمسعود رحیمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۷۸ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل‌سازی حمل و نقل، شبیه‌سازی جریان ترافیک، ایمنی ترافیک و حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.



سعید طاهری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه زنجان اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طرح هندسی ایمن راه، شبیه‌سازی جریان ترافیک و محاسبات آمارگیری در برنامه‌ریزی حمل و نقل بوده و در حال حاضر بعنوان کارشناس وظیفه-اجرا بخش عملیات خاکی در قطعه ۳ و ۴ از پروژه ملی راهسازی قزوین، الموت، تنکابن مشغول بکار است.

