فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و یکم، شماره ۸۶، پاییز ۱۴۰۰، ص. ۷۸-۷۱

بررسی مدیریت چراغ‌راهنمایی به‌صورت کنترل تطبیقی و مقایسه آن با زمان‌بندی ثابت

صالح اردمه، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

افشین شریعت مهیمنی (مسئول مکاتبات)، استاد دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: shariat@iust.ac.ir

چکیده

یکی از موارد مهم در مدیریت شهری، هوشمند سازی تقاطع‌های هم‌سطح برای کنترل بهتر جریان ترافیک و بالا بردن ضریب ایمنی در آن است. کنترل چراغ‌راهنمایی در یک تقاطع چراغ‌دار به سه شکل انجام می‌شود: زمان‌بندی ثابت، کنترل هوشمند و کنترل تطبیقی. در این مقاله سعی بر مقایسه‌ی میان زمان‌بندی‌های ثابت و تطبیقی برای یک تقاطع بوده و شاخص‌های موردبررسی در این مقایسه، میزان تأخیر و طول صف درنظرگرفته شده است. برای این منظور تقاطع موردنظر را در شبیه‌ساز خردنگر ایمسان شبیه‌سازی کرده و با اعمال هر یک از اشکال زمان‌بندی (ثابت و تطبیقی) به بررسی شاخص‌های موردنظر پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترل تطبیقی توانسته است که تأخیر، تعداد توقف و صف خودروها را در تقاطع نسبت را به زمان‌بندی ثابت کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: کنترل تطبیقی چراغ‌راهنمایی، شبیه‌سازی، ایمسان، تقاطع‌های چراغ‌دار

۱. مقدمه

اثرات منفی اقتصادی و اجتماعی تراکم ترافیکی روزبه‌روز در حال افزایش بوده و لذا وجود یک سیستم کارآمد و اثربخش برای شبکه ترافیک، بسیار حیاتی است. بی‌شک مهم‌ترین نقاط تراکم ترافیک در شبکه راه‌های درون‌شهری، تقاطع‌ها می‌باشند که با رفع مشکلات تردد در آن‌ها، می‌توان ظرفیت شبکه حمل‌ونقل شهری را افزایش داد.

به‌منظور افزایش ظرفیت یک تقاطع و به طبع آن افزایش ظرفیت شبکه حمل‌ونقل، نیازمند این هستیم که از میان اشکال مختلف کنترل چراغ‌راهنمایی، شکلی را انتخاب کنیم که بتواند بهترین تصمیم را بر اساس شرایط موجود اتخاذ کند. یکی از اشکال مهم کنترل چراغ‌راهنمایی، کنترل تطبیقی است. در این کنترل زمان‌بندی چراغ، به‌صورت پیوسته و بر اساس یک الگوریتم، الگوی خودروهای ورودی به تقاطع تنظیم می‌شود. در طول این فرایند زمان‌سبزی به هریک از رویکردهای تقاطع بر اساس پیش‌بینی از شرایط تقاطع در سیکل بعدی اختصاص داده می‌شود. لذا همان‌طور که جریان ورودی از یک سیکل به سیکل بعدی تغییر می‌کند، طول زمان سبز تخصیص‌یافته به هر رویکرد نیز عوض می‌شود.

برای مقایسه میان کنترل‌های مختلف چراغ‌راهنمایی، از شاخص‌هایی مانند تأخیر، تعداد توقف و طول صف استفاده می‌شود. برای این منظور با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از یکی از تقاطع‌های شهر تهران، مقایسه خود را میان این دو شکل کنترل انجام داده تا بتوان شکلی از کنترل را انتخاب کرد که درمجموع بتواند بهترین نتایج را داشته باشد.

به‌منظور بررسی کنترل تقاطع‌ها با زمان‌بندی ثابت و هوشمند حسینلو و همکاران میزان انتشار غلظت آلاینده‌های مختلف، زمان تأخیر، زمان توقف و میانگین سرعت جریان را تحت زمان‌بندی ثابت و هوشمند برای یک شبکه ترافیکی در منطقه ۷ شهرداری، با استفاده از شبیه‌ساز ایمسان محاسبه کردند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده‌ی این امر بود که با تغییر زمان‌بندی از ثابت به هوشمند، جریان ترافیک روان‌تر شده، میانگین سرعت ۱۶ درصد افزایش یافته و میزان انتشار آلاینده‌های CO_2 و NO_x به ترتیب ۶ و ۸ درصد کاهش یافته است.

رحیمی و همکاران نیز به بررسی میزان کارایی سیستم هوشمند ترافیکی اسکتس در کاهش متوسط تأخیر وسایل پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده از آن را با میزان تأخیر برآورد شده از مدل وبستر مقایسه کردند. درنهایت نشان دادند که در صورت استفاده از سیستم هوشمند اسکتس، ۲۰ درصد از میزان تأخیر کاسته می‌شود.

جهت ارزیابی میزان تأثیر بهینه‌سازی چراغ‌راهنمایی بر کارایی جریان ترافیکی، رحیمی و همکاران با مدل‌سازی سه تقاطع در شهر اصفهان و بهینه‌سازی آن در نرم‌افزار سینکرو نشان دادند که درصورتی‌که تقاطع چراغ‌دار به‌درستی زمان‌بندی شود میزان تأخیر در تقاطع‌های موردبررسی به ترتیب ۱۱، ۱۴ و ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت.

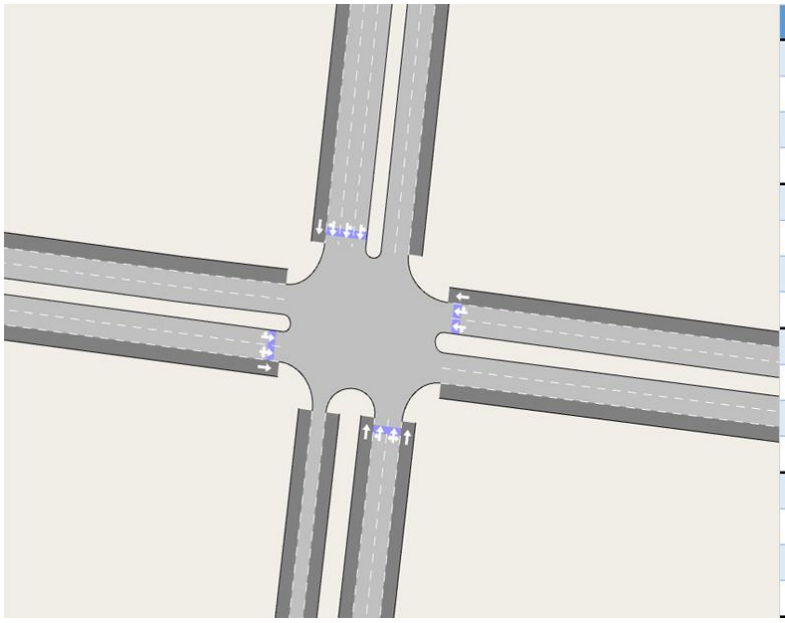
مک‌کنی[1] و همکارش الگوریتمی ارائه کرده‌اند که قادر است چراغ‌راهنمایی را بر اساس مشاهدات ترافیکی که توسط شناساگرها به دست می‌آید را کنترل کند و این الگوریتم به‌صورت پیوسته جهت مطابقت با تقاضای ترافیکی به‌روز می‌شود. جهت ارزیابی سیستم توسعه داده‌شده از اطلاعات شهر اوتاوا در کانادا استفاده می‌شود. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار SUMO انجام می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد کلی شبکه وقتی با زمان‌بندی ثابت مقایسه می‌شود، بهبود یافته است.

سیستم کرونوس[2] یکی از سیستم‌هایی است که برای کنترل تقاطع به شکل تطبیقی استفاده می‌شود. بایلوت و همکارانش الگوریتمی را پیاده‌سازی کرده‌اند که مشکلات سایر سیستم‌ها ازجمله اتکای زیاد آن به حلقه‌های مغناطیسی و عدم بهینه‌سازی هم‌زمان چند تقاطع را رفع می‌کند. این الگوریتم برای شناسایی پارامترهای ترافیکی مثل طول صف، از پردازش تصویر استفاده می‌کند. برای ارزیابی این سیستم، یک تقاطع به مدت ۸ ماه تحت کنترل این سیستم و دو سیستم دیگر به نام‌های S-Start و C-Start قرار

گرفت. نتایج حاصله از این بررسی نشان داد که در سیستم کرونوس نسبت به دو سیستم دیگر، سیکل‌ها کوتاه‌تر شده و تأخیر و تعداد توقف کمتری نسبت به دو سیستم دیگر دارا است. سیستم‌های کنترل تطبیقی یکی از روش‌هایی می‌باشند که برای کنترل تقاطع استفاده می‌شوند، معروف‌ترین این سیستم‌های اسکتس[۳]، اسکوت[۴]، اوپاک[۵] و ارهودس[۶] می‌باشند. هرکدام از این سیستم‌های برای کنترل تقاطع و زمان‌بندی آن از یک الگوریتم منحصربه‌فرد استفاده کرده تا بتوانند در تقاطع یا تقاطع‌هایی را که قرار است کنترل کنند، عبور جریان ترافیک را حداکثر کرده و تأخیر و توقف را کاهش دهند. ازآنجایی‌که در شهرهای بزرگ کشورمان ازجمله تهران و مشهد از سیستم کنترل تطبیقی اسکتس استفاده شده‌است، لذا دانستن نحوه عملکرد این سیستم‌ها یک نیاز اساسی به شمار رفته، زیرا برای پیاده‌سازی یک سیستم پویا نیازمند دانستن پارامترهای اساسی و ارائه یک ساختار مناسب برای آن هستیم. در این پژوهش با ارائه یک سیستم کنترل تطبیقی برای تقاطع، نشان می‌دهیم که این سیستم‌ها قابلیت کنترل بهتر جریان و کاهش تأخیر قابل‌توجه در تقاطع را دارا می‌باشند.

۲. بررسی وضع موجود تقاطع

تقاطع موردمطالعه همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در منطقه ٤ تهران واقع است. در این شکل نمایشی از تقاطع شبیه‌سازی‌شده به همراه احجام ورودی به تقاطع نمایش داده شده است.



رویکرد	جهت رویکرد	حجم عبوری (veh/h)
شمالی	گردش به راست	۶۰
	حرکت مستقیم	۴۰۰
	گردش به چپ	۳۵۰
	دور زدن	۲۴۰
شرقی	گردش به راست	۱۶
	حرکت مستقیم	۹۲۰
	گردش به چپ	۷۲۰
	دور زدن	۲۴۰
جنوبی	گردش به راست	۴۸۴
	حرکت مستقیم	۳۴۴
	گردش به چپ	۳۷۲
	دور زدن	۱۴۰
غربی	گردش به راست	۳۲۰
	حرکت مستقیم	۱۴۰۵
	گردش به چپ	۳۲۰
	دور زدن	۴۸۰

شکل ۱. احجام عبوری از تقاطع به تفکیک جهت

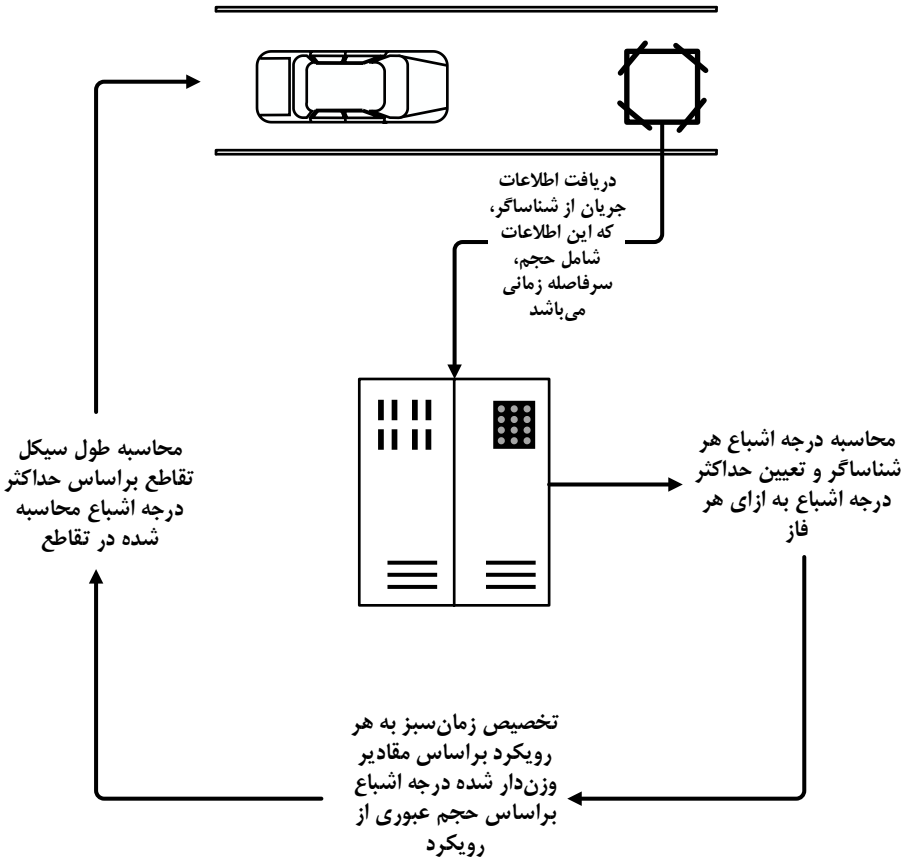
چهارراه موردنظر تقاطع خیابان‌های دلاوران و تکاوران بوده که در آن خیابان دلاوران خیابان اصلی تقاطع و خیابان تکاوران، خیابان فرعی محسوب می‌شود.

آماربرداری این تقاطع مابین ساعت ٤ الی ۷ عصر انجام‌شده و بر اساس آماربرداری انجام‌شده از تقاطع، ساعت اوج مابین ساعت ۵ الی ٦ عصر است.

۳. روش پژوهش

در این مرحله با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از تقاطع موردنظر، وضعیت موجود تقاطع را در نرم‌افزار ایمسان شبیه‌سازی کرده و در مرحله بعد با اعمال کنترل‌های مختلف برای مدیریت تقاطع، مقایسه‌ای میان شکل‌های مختلف زمان‌بندی یک تقاطع چراغ‌دار انجام شده است. در این مقایسه با

بررسی میزان تغییرات شاخص‌های مختلف مانند تأخیر، طول صف، تعداد توقف، زمان توقف و زمان سفر میان کنترل تطبیقی ارائه‌شده با زمان‌بندی ثابت، میزان بهبود هریک متغیرها را تعیین می‌شود.



شکل ۲. الگوریتم کلی استفاده‌شده برای کنترل تطبیقی تقاطع

در این الگوریتم زمان‌بندی بر اساس حداکثر درجه‌ی اشباع اندازه‌گیری شده در هر رویکرد محاسبه‌شده و میزان طول سیکل و تخصیص به هر فاز به میزان درجه‌ی اشباع هر رویکرد و حجم عبوری از آن است.

زمان‌بندی اولیه‌ای که برای شروع به تقاطع اعمال می‌شود مشابه زمان‌بندی ثابت بوده ولی با این تفاوت که در طول زمان شبیه‌سازی، مقادیر طول سیکل و تخصیص فاز تغییر می‌کند. میزان تغییرات طول سیکل برای تقاطع در بازه ۷۰ تا ۱۲۰ بوده که بر اساس میزان حداکثر درجه اشباع اندازه‌گیری شده برای تقاطع، مقدار آن تعیین می‌شود. این الگوریتم به‌طور پیوسته اطلاعات را از شناساگرها دریافت کرده و ٤ سیکل یک بار زمان‌بندی را بر اساس محاسبات انجام‌شده تغییر می‌دهد.

نحوه محاسبه درجه اشباع برای هر شناساگر مطابق با رابطه ۱ و رابطه ۲ است؛

$$g' = g - (T - t \times n) \quad (۱)$$

$$DS = \frac{g'}{g} \quad (۲)$$

T: مجموع زمان کل عدم اشغالی شناساگر

t: متوسط زمان عدم اشغالی به ازای هر خودرو که لازم است

n: تعداد کل خودروهای عبوری منهای یک

g': مقدار زمان سبز مؤثر

الگوریتم ارائه‌شده برای کنترل یک تقاطع چراغ‌دار به شکل کنترل تطبیقی به شرح شکل ۲ است.

g: مقدار زمان سبز

برای بررسی میزان بهبود الگوریتم کنترل تطبیقی ارائه‌شده برای یک تقاطع به نسبت سایر اشکال کنترل، دو شکل زمان‌بندی ثابت و کنترل تطبیقی را به تقاطع اعمال کرده و درنهایت مقایسه‌ای میان این دو انجام می‌شود.

در زمان‌بندی ثابت، پارامترهای زمان‌بندی بر اساس مکشین[۷] محاسبه شده و کالیبراسیون شبیه‌سازی با استفاده از مقایسه‌ی طول صف اندازه‌گیری شده تقاطع با طول صفی که در شبیه‌سازی مشاهده می‌شود، مقایسه شده تا شبیه‌سازی تا حد امکان با آنچه در واقعیت رخ می‌دهد مطابقت داشته باشد. در این زمان‌بندی طول سیکل ۷۰ ثانیه، به‌صورت دوفازه (فاز اصلی ۳۷ ثانیه و فاز فرعی ۲۳ ثانیه)، مجموع مدت‌زمان زرد و تمام قرمز آن ۵ ثانیه است.

٤. تحلیل داده‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را به ازای هر یک از اشکال کنترل تقاطع (زمان‌بندی ثابت و تطبیقی) را گردآوری می‌کنیم. پارامترهایی که برای مقایسه انتخاب می‌کنیم به شرح زیر است؛ تأخیر، متوسط صف، تعداد توقف، مدت‌زمان توقف و زمان سفر در جدول ۱ نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را بر اساس پارامترهایی که برای مقایسه اشکال مختلف کنترل تعیین‌شده، به تفکیک نوع کنترل مشخص شده است.

جدول ۱. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به ازای هریک از اشکال کنترل تقاطع

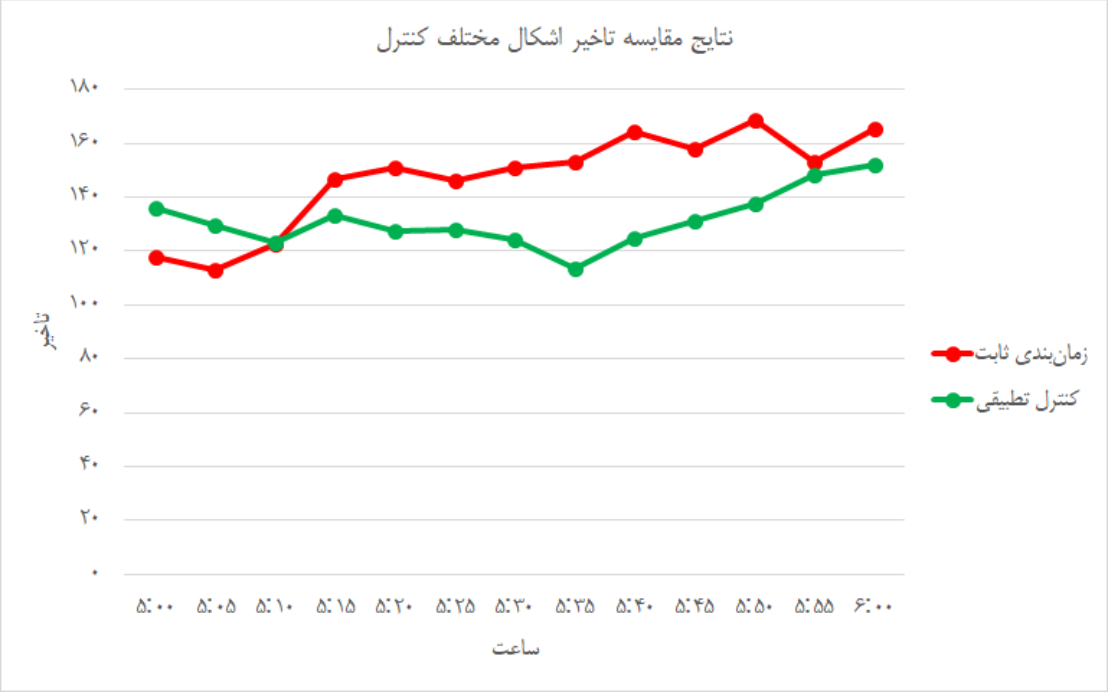
پارامتر	زمان بندی ثابت	کنترل تطبیقی	میزان بهبود تطبیقی نسبت به زمان‌بندی ثابت	واحد
تاخیر	۱۴۷.۰	۱۳۱.۴	۱۱٪	sec/km
متوسط صف	۱۲۸.۵	۱۱۳.۷	۱۱٪	veh
تعداد توقف	۰.۴	۰.۳	۲۴٪	#/veh/km
زمان توقف	۱۱۵.۱	۱۰۲.۰	۱۱٪	sec/km
زمان سفر	۲۱۳.۲	۱۹۷.۷	۷٪	sec/km

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان بهبود سیستم کنترل تطبیقی برای پارامتر تأخیر به میزان ۱۱ درصد نسبت به زمان‌بندی است. همچنین برای سایر پارامترها مانند متوسط طول صف، زمان توقف و زمان سفر میزان بهبود نسبت به زمان‌بندی ثابت به‌طور متوسط ۱۰ درصد است.

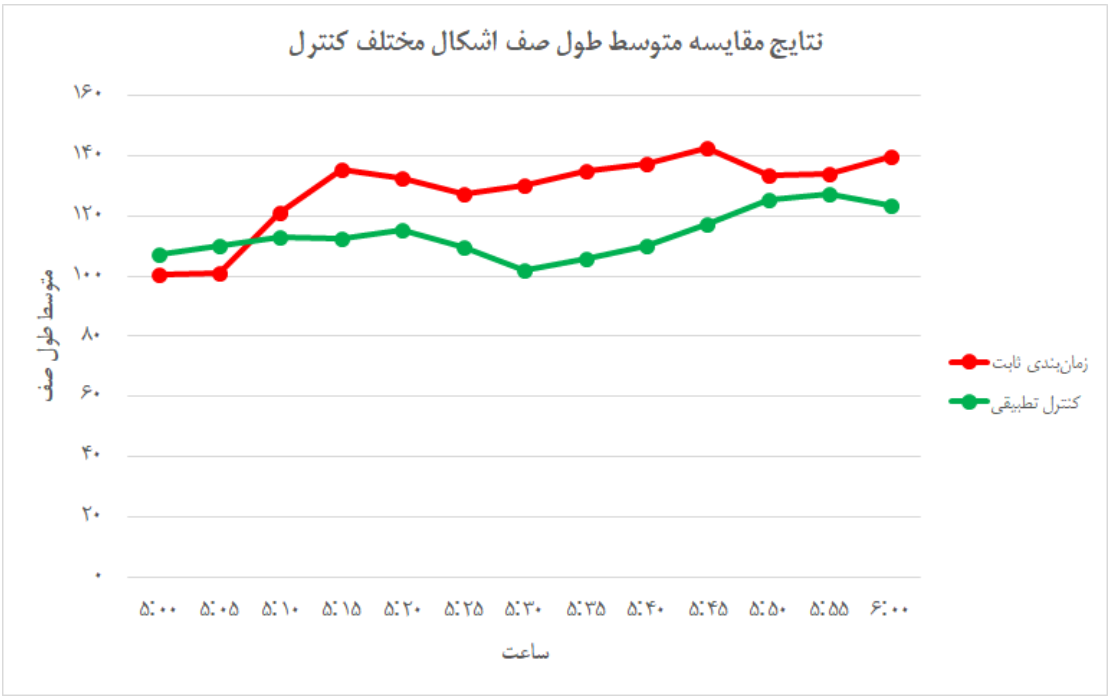
در ادامه دو نمودار مقایسه‌ای تأخیر تقاطع و طول صف به تفکیک ۵ دقیقه‌ای برای ساعت اوج آورده شده است. در این نمودارها با محاسبه پارامتر موردنظر در هر نقطه به ازای کنترل تطبیقی ارائه‌شده با زمان‌بندی ثابت و روند تغییرات پارامتر در لحظات مختلف شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

در شکل۳ که مقایسه تأخیر خودروها بر اساس این دو شکل کنترل تقاطع مشخص شده است، مقادیر تأخیر در سیستم کنترل تطبیقی در شروع شبیه‌سازی بالاتر از مقادیر دیگر کنترل‌های است که این امر به علت کم بودن حجم خودروهای موجود در داخل شبکه است، اما هر چه قدر که زمان می‌گذرد و تقاطع به ظرفیت خود نزدیک می‌شود، سیستم کنترل تطبیقی زمان‌بندی بهتری را نسبت به سایر کنترل‌ها از خود نشان داده و باعث کمتر شدن تأخیر در تقاطع به ازای خودروهای عبوری می‌شود.

در شکل ٤ مقایسه‌ای میان متوسط طول صف خودروهای شبکه انجام شده است. در این مقایسه به خاطر کم بودن حجم در شروع شبیه‌سازی و عدم وجود پیک، مقدار طول صف به ازای هر شکل کنترل تقریباً باهم برابر است؛ اما با گذشت زمان و رسیدن به پیک، سیستم کنترل تطبیقی سعی می‌کند که نواسانات جریان خودروهای عبوری را کاهش دهد و زمان‌بندی تقاطع را بر اساس تقاضای موجود به تقاطع اعمال کند.



شکل ۳. نتایج مقایسه تأخیر خودروها در شبکه به تفکیک هر شکل کنترل



شکل ٤. نتایج مقایسه متوسط صف خودروها در شبکه به تفکیک هر شکل کنترل

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی شکل‌های مختلف کنترل تقاطع چراغ‌دار در یک تقاطع واقعی با استفاده از شبیه‌ساز خردنگر است. برای این منظور تقاطع چراغ‌دار موردنظرمان را با الگوریتم تطبیقی توسعه داده‌شده کنترل کرده و نتایج به‌دست‌آمده از آن را با زمان‌بندی ثابت مقایسه می‌کنیم. شاخص‌های موردنظر ما برای این مقایسه تأخیر و طول صف می‌باشند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم کنترل تطبیقی باعث کاهش این پارامترها می‌شوند. میزان این کاهش به‌طور متوسط برای پارامترهای موردنظر تقریباً ۱۰ درصد شده است. همچنین یکی از دلایلی که باعث می‌شود که الگوریتم کنترل تطبیقی باعث بهبود عملکرد تقاطع شود، تطبیق طول سیکل و تخصیص زمان سبز به هر فاز متناظر با جریان ترافیکی که توسط شناساگرها اندازه‌گیری شده، است. در کنار پارامترهای تأخیر و طول صف، پارامترهایی نظیر تعداد توقف، زمان توقف و زمان سفر نیز اندازه‌گیری شده‌اند؛ که در این میان تعداد توقف خودروها در سیستم کنترل تطبیقی کاهش قابل‌توجهی داشته و میزان این کاهش ۲۲,۵۲ درصد نسبت به زمان‌بندی ثابت است. دلیل این امر تخصیص مناسب زمان سبز برای عبور خودروها با توجه به حجم متقاضی عبور و افزایش طول سیکل توسط الگوریتم است.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. McKenney
2. CRONOS
3. SCATS
4. SCOOT
5. OPAC
6. RHODES
7. W.R. McShane

۷. مراجع

– حاجی حسینلو، منصور؛ سید علی قائمی و عماد سخاوتی، ۱۳۹۱، ارزیابی اثرات کنترل تقاطع‌های با زمان‌بندی ثابت و هوشمند بر جریان ترافیک و آلودگی هوای شبکه ترافیکی درون‌شهری با استفاده از شبیه‌سازی، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

– رحیمی، امیرمسعود؛ محمود اکبرزاده و احمد اکبرزاده، ۱۳۹۷، بررسی تأثیر بهینه‌سازی زمان‌بندی بر کارایی تقاطع‌های چراغ‌دار (مطالعه موردی: ۳ تقاطع در شهر اصفهان، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران و معماری با تأکید بر فن‌آوری‌های بومی ایران، تهران، انجمن فناوری‌های بومی ایران.

– رحیمی، مصطفی و حبیب اله نصیری، ۱۳۹۵، مقایسه تأخیر وسایل نقلیه در تقاطع‌های چراغ‌دار با استفاده از سیستم هوشمند ترافیکی SCATS و مدل وبستر، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران، معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک.

– دهستانی بافقی، رضا؛ مجتبی رجبی بهاءآبادی و علی‌اکبر فروتن، ۱۳۹٤، سیستم هوشمند کنترل چراغ در تهران :SCATSمعرفی، مشکلات موجود و راهکارهایی برای بهبود عملکرد، کنفرانس ملی مهندسی عمران و محیط‌زیست، قزوین، معاونت پژوهشی دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.

- Federal Highway Administartion. (2008). Signal Timing Manual. Washington, DC: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

- Lowrie, P. R. (1982) The Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System – Principles, Methodology, Algorithms. In Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signaling. London, United Kingdom, pp. 67-70.

- R.P. Roess, E.S. Prassas and W.R. McShane, 2011, Traffic Engineering, Fourth Edition, Pearson Publication, United States of America.

- McKenney, D., White, T., 2013. Distributed and adaptive traffic signal control within a realistic traffic simulation. Eng. Appl. Artif. Intell. 26 (1), 574–583.

- Boillot, F., Midenet, S., Pierrelee, J. C., 2006. The real-time urban traffic control system

CRONOS: Algorithm and experiments. Transportation Research Part C: EmergingTechnologies 14 (1), 18–38.
- J. H. Kell and I. J. Fullerton, Manual of Traffic Signal Design, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Inst. Transp. Eng., Prentice-Hall, 1998.