فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
بهار ۱۳۸۵، شماره‌ی سی و سوم، ص. ۳۱-۳۶

تابع زمان تأخیر برای تقاطع‌های با چراغ راهنمایی

هدایت دکایی‌آشتیانی (استاد)
احسان مظلومی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

تأخیر در تقاطع‌ها بخش مهمی از زمان سفر در شبکه‌های خیابانی را تشکیل می‌دهد که معمولاً در مدل‌های تخصیص ترافیک یا به‌صورت مقداری ثابت و یا برای هر ورودی به تقاطع تنها تابعی از حجم ترافیک همان ورودی در نظر گرفته می‌شود. یکی از دلایل این امر مشکلات ناشی از در نظرگیری توابع زمان تأخیر وابسته به حجم‌های ترافیک ورودی‌های مختلف به تقاطع در مدل تخصیص ترافیک است. دلیل دیگر آن عدم وجود توابع تأخیر مناسب برای اندازه‌گیری تأخیر در تقاطع‌ها برحسب مقادیر جریان‌های ورودی به تقاطع، از جمله برای تقاطع‌های با چراغ راهنمایی است. در این نوشتار، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از چند تقاطع چراغ‌دار شهر تهران، دو تابع زمان تأخیر برای حرکت‌های مختلف در تقاطع پیشنهاد شده است که نه تنها تابعی از زمان‌بندی چراغ و حجم ترافیک مربوط به ورودی مورد نظر است، بلکه به حرکت‌های هم‌فاز متداخل با حرکت مورد نظر نیز وابسته است. در قسمت دیگری از این نوشتار به بررسی تأثیر وجود چراغ در مقدار تأخیر یک تقاطع بدون چراغ، با استفاده از اطلاعات گردآوری شده از حجم ترافیک و تأخیر و زمان‌بندی چراغ در یک تقاطع چراغ‌دار که قبلاً بدون چراغ بوده است، پرداخته‌ایم. در قسمت آخر، تأثیر وجود چراغ هوشمند در مقدار تأخیر یک تقاطع چراغ‌دار، با استفاده از اطلاعات گردآوری شده از یک تقاطع مجهز به سیستم هوشمند، بررسی شده است.

مقدمه

یکی از اطلاعات مورد نیاز مدل‌های تخصیص ترافیک در برنامه‌ریزی حمل و نقل شهری، آگاهی از میزان تأخیر در تقاطع‌هاست. زمان تأخیر در یک تقاطع به عوامل متعددی، نظیر چگونگی رفتار رانندگان و شرایط خاص منطقه‌یی، مشخصات فیزیکی تقاطع و خیابان‌های ورودی به آن، زمان‌بندی چراغ در تقاطع، و حجم و ترکیب ترافیک در خیابان‌های ورودی به تقاطع، بستگی دارد. می‌دانیم، که مسئله‌ی تخصیص ترافیک، مادامی که تابع زمان سفر ـ حجم هر کمان تنها تابعی از حجم ترافیک در خود آن کمان، و نیز تابع تأخیر هر ورودی به یک تقاطع تنها تابعی از حجم ترافیک همان ورودی به تقاطع باشد، قابل تبدیل به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی محدب است که روش‌های مناسبی برای حل آن وجود دارد.[۱] ولی اگر توابع زمان سفر ـ حجم کمان‌ها به حجم ترافیک سایر کمان‌ها، و توابع تأخیر در تقاطع‌ها به حجم ترافیک سایر ورودی‌های وابسته باشند، در این صورت مسئله‌ی تخصیص ترافیک قابل تبدیل به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی محدب نیست و حل آن مشکل می‌شود. از این رو، در تمام نرم‌افزارهای موجود برای تخصیص ترافیک فرض بر آن است که تابع عملکرد هر کمان تنها به حجم ترافیک در خود آن کمان، و تابع تأخیر هر ورودی تقاطع تنها به حجم ترافیک آن ورودی وابسته است. فرض عدم وابستگی زمان تأخیر در حرکت‌های بدون تداخل در تقاطع‌های چراغ‌دار، به حجم ترافیک دیگر حرکت‌های تقاطع فرض قابل قبولی است، اما در مورد حرکت‌های تداخل‌دار این فرض از قوت کم‌تری برخوردار است. به عبارت دیگر در تابع زمان تأخیر برای حرکت‌های تداخل‌دار در یک تقاطع با چراغ راهنمایی، باید حجم جریان ترافیک حرکت متداخل نیز در نظر گرفته شود. به‌طور کلی تأخیر در تقاطع‌های چراغ‌دار در برگیرنده‌ی سه جزء اصلی است:[۲]

تأخیر یکنواخت: این تأخیر وقتی اتفاق می‌افتد که نرخ ورود به تقاطع ثابت فرض شود.

تأخیر تصادفی: این تأخیر بیانگر تأخیر حاصل از تصادفی (احتمالی) بودن نرخ ورود است.

تأخیر اشباع: این تأخیر وقتی اتفاق می‌افتد که متوسط نرخ ورود بیشتر از متوسط نرخ خروج باشد.

به‌طور کلی مدل‌های برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغ‌دار را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد.[۳] دسته‌ی اول مدل‌هایی هستند که با فرض کم‌تر بودن حجم ترافیک از ظرفیت ورودی، و با استفاده از اصول نظریه‌ی صف بنا می‌شوند. معروف‌ترین مدل این دسته، «مدل وبستر» است. دسته‌ی دوم مدل‌هایی هستند که با فرض بیشتر بودن حجم ترافیک از ظرفیت ورودی بنا می‌شوند. معروف‌ترین مدلِ این دسته، «مدل هاردل» است.[۳] دسته‌ی سوم مدل‌های برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغ‌دار «مدل‌های ترکیبی»اند. عملکرد این مدل‌ها که از ترکیب مدل‌های دسته‌ی

اول و دوم ساخته می‌شوند، بسیار واقعی‌تر است. از معروف‌ترین مدل‌های این دسته، می‌توان به مدل HCM اشاره کرد[۴] که پیشینه‌ی روابط آن قابل دسترسی است.[۵] در ویرایش سال ۱۹۸۵ کتاب HCM، مدل زیر به‌منظور برآورد تأخیر افزایشی هر گروه خط عبور در تقاطع چراغ‌دار پیشنهاد شده است:

$$d = ۲۲۵x^{۲}[(x-۱) + \sqrt{(x-۱)^{۲} + \frac{۱۶x}{Q}}] \qquad (۱)$$

که در آن:

x = درجه‌ی اشباع (نسبت حجم به ظرفیت خیابان)،

Q = ظرفیت (وسیله بر ساعت).

لازم به توضیح است که برای به دست آوردن کل تأخیر در هر گروه خط عبور باید تأخیر یکنواخت به این تأخیر افزوده شود. بین روابط ذکر شده در ویرایش ۱۹۸۵ و ویرایش ۱۹۹۴ کتاب HCM مقایسه‌یی انجام شده است.[۶] بنابر مقایسه‌ی انجام شده، مدل ذکر شده در ویرایش جدید کمی از مدل قدیمی بهتر عمل می‌کند. مدل‌های دیگری که در این دسته جای دارند عبارت‌اند از مدل نرم‌افزار TRANSYT و مدل استرالیایی (مدل اکیلیک).[۳]

آنچه که در بالا بدان اشاره شد، روابطی است که معمولاً برای برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغ‌دار به کار می‌رود. واضح است که سازگاری این روابط با شرایط محیطی و فرهنگ رانندگی ایران الزامی نیست. مثلاً در خارج از ایران حق تقدم در تقاطع‌ها رعایت می‌شود، در حالی که در ایران عدم رعایت این امر باعث افزایش تأخیر در حرکت‌های اصلی می‌شود. بنابراین، این نیاز احساس می‌شود که برای تقاطع‌های چراغ‌دار ایران نیز تابع تأخیری ساخته شود.

در ایران، پژوهشکده‌ی حمل ونقل دانشگاه صنعتی شریف در مطالعه‌یی پیرامون تعدادی از تقاطع‌های چراغ‌دار در ایران موفق به ساخت تابعی شده است که مقدار کل زمان تأخیر را برای هر یک از ورودی‌های تقاطع، با توجه به کل حجم ترافیک و عرض خیابان ورودی و زمان‌بندی چراغ در تقاطع محاسبه می‌کند.[۷]

هدف این نوشتار ارائه‌ی مدل‌هایی به منظور برآورد زمان تأخیر در تقاطع‌های چراغ دار در ایران است، به‌گونه‌یی که در درجه‌ی اول مقدار تأخیر هر ورودی را برحسب تابعی از کل حجم ترافیک آن ورودی در نظر گیرد و در درجه‌ی دوم مقدار تأخیر هر حرکت تقاطع را تابعی از حجم ترافیک آن حرکت و سایر حرکت‌های ورودی به تقاطع در نظر گیرد. در ادامه‌ی این نوشتار، میزان تأثیر چراغ در تأخیر یک تقاطع بدون چراغ و همچنین تأثیر هوشمند بودن چراغ راهنمایی در تأخیر یک تقاطع چراغ‌دار بررسی شده است.

گردآوری اطلاعات

برای ساخت مدل‌های زمان تأخیر در تقاطع‌های با چراغ راهنمایی اساساً سه نوع اطلاعات مورد نیاز است: اطلاعات مربوط به حجم ترافیک، اطلاعات مربوط به زمان تأخیر در تقاطع، و اطلاعات مربوط به زمان‌بندی چراغ در تقاطع. به این منظور ۵ تقاطع ایوانک ــ فرحزادی، شریعتی ــ دولت، مجاهدین اسلام ــ ایران، رسالت ــ حسن‌بنا و رسالت ــ اثنی‌عشری در سطح شهر تهران انتخاب و با کمک شرکت مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک تهران اطلاعات مورد نیاز جمع آوری شدند. این تقاطع‌ها، به نحوی انتخاب شدند که اولاً در سطح شهر تهران گسترده باشند و ثانیاً از نوعی باشند که بیش از همه در شبکه شهر تهران وجود دارند. لازم به توضیح است که در تقاطع‌های رسالت ــ حسن بنا و رسالت ــ اثنی‌عشری به علت حجم زیاد ترافیک در خیابان رسالت، آمارگیری فقط در خیابان‌های حسن بنا و اثنی‌عشری انجام شد.

اطلاعات مربوط به حجم ترافیک در این تقاطع‌ها به تفکیک نوع حرکت (گردش به راست، مستقیم، گردش به چپ) و نوع وسیله‌ی نقلیه در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌یی برای مدت ۳ ساعت گردآوری شد. سپس با استفاده از ضرایب هم‌سنگ سواری برای وسایل نقلیه‌ی مختلف، که در جدول ۱ ارائه شده است، کل حجم ترافیک هم‌سنگ سواری برای هر حرکت محاسبه شد. لازم به توضیح است این ضرایب از مطالعات جامع حمل و نقل مشهد که توسط پژوهشکده‌ی حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف انجام شده، برداشت شده است.[۷]

زمان سفر وسایل نقلیه برای عبور از تقاطع، با استفاده از ثبت زمان عبور نمونه‌یی از وسایل نقلیه سواری در محل ورودی‌ها (در پشت صف تشکیل شده در پشت چراغ) و خروجی‌های هر تقاطع جمع‌آوری شد. در نهایت به‌منظور محاسبه‌ی مدت زمان تأخیر وسایل نقلیه، مدت زمان سفر آزاد عبور از تقاطع از آن کم شد. مدت زمان سفر آزاد، با احتساب سرعت آزاد ۶۰، ۵۰ و ۴۰ کیلومتر در ساعت به‌ترتیب برای خیابان‌های از نوع شریانی درجه ۱، شریانی درجه ۲ و جمع‌کننده محاسبه شد.[۸] سپس با میانگین‌گیری وزنی روی تأخیر حرکت های هر ورودی (با وزنی

جدول ۱. ضرایب همسنگ سواری برای انواع وسایل نقلیه.

نوع وسیله	ضریب
سواری و مسافربر	۱٫۲۵
تاکسی	۲
وانت	۱
موتور و دوچرخه	۰٫۵
مینی‌بوس	۲٫۵
اتوبوس‌واحد	۵
اتوبوس‌غیرواحد	۲٫۵
باری سنگین	۲٫۵

برابر حجم ترافیک آن حرکت)، برای هر ورودی تقاطع متوسط تأخیر در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌یی محاسبه شد. همچنین به‌منظور مقایسه‌ی مقادیر تأخیر اندازه‌گیری شده توسط روش این نوشتار با روش پیشنهاد شده در HCM، در سه ورودی از ورودی‌های آمارگیری شده، به روش HCM نیز آمارگیری شد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده، حاکی از صحت روش آمارگیری ذکر شده در این نوشتار است.[۹] همچنین کلیه‌ی اطلاعات مربوط به فازبندی و زمان‌بندی چراغ در کلیه‌ی تقاطع‌های آمارگیری شده در تمام مدت آمارگیری، جمع‌آوری شد.

مدل ۱

در مطالعات جامع حمل ونقل شهر مشهد[۷] یک مدل برای برآورد مدت زمان تأخیر در هر ورودی تقاطع به‌صورت تابعی از کل حجم ترافیک آن ورودی ارائه شده است که تأخیر یکسانی را برای تمام حرکت‌های ورودی به تقاطع برآورد می‌کند. مدل ۱ این نوشتار، الهام گرفته از مدل به کار رفته در مطالعات جامع حمل ونقل شهر مشهد است. شکل ریاضی این مدل به‌صورت زیر است:

$$d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{w\times s})} + a(\frac{V}{Q})^b \qquad (2)$$

که در آن:

d = متوسط زمان تأخیر (ثانیه) برای هر حرکت خیابان ورودی برای عبور از تقاطع،

c = طول دوره‌ی چرخه چراغ (ثانیه)،

g = طول دوره‌ی سبز برای حرکت مورد نظر (ثانیه)،

V = کل حجم جریان ترافیک در خیابان ورودی (هم‌سنگ سواری در ساعت)،

s = نرخ تردد اشباع (s = ۶۰۰) برای یک متر عرض عبور (هم‌سنگ سواری در ساعت چراغ سبز)،

w = عرض سواره‌رو خیابان ورودی (متر)،

Q = ظرفیت خیابان ورودی (هم‌سنگ سواری در ساعت)، $Q = \frac{g}{c}s$.

a و b نیز پارامترهای مدل‌اند.

برای پرداخت مدل ۱، مقادیر Vو d و c و g و w با استفاده از نتایج آمارگیری قابل دست یابی‌اند. پرداخت مدل در دو مرحله انجام شد. مرحله‌ی اول پرداخت، به‌منظور دست‌یابی به مقداری منطقی برای پارامتر b صورت گرفت. نتیجه‌ی این مرحله از پرداخت انتخاب مقدار ۲ برای پارامتر b بود. دلیل این انتخاب برقراری یک نظم منطقی برای پارامتر a در حرکت‌های گردش به چپ، مستقیم و گردش به راست است. در مرحله‌ی دوم با ثابت قراردادن پارامتر b برابر ۲، مقدار تنها پارامتر مدل (یعنی a)، برای کلیه‌ی حرکت‌های آمارگیری شده و نیز برای تمام ورودی‌های آمارگیری شده به‌دست آمد. همچنین یکبار مدل فوق به‌منظور برآورد پارامتر a، با استفاده از تمام اطلاعات جمع‌آوری شده به‌تفکیک حرکت پرداخت شد. نتیجه‌ی این پرداخت در جدول ۲ گزارش شده است. در این جدول مقدار پارامتر a، آماره‌ی t مربوط به این پارامتر، میانگین تأخیر برآورد شده و مشاهده شده و نیز شاخص برازندگی بین مقادیر برآورد شده و مشاهده شده (R^2) گزارش شده است. از آنجا که هدف از پرداخت مدل ۱، ارائه‌ی یک تابع تأخیر برای هر ورودی (شامل تمام حرکت‌ها) در یک تقاطع بود، و باتوجه به نتایج گزارش شده در جدول ۲، مدل ۱ این نوشتار به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\text{مدل ۱: } d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{600w})} + 32(\frac{V}{Q})^2 + 5 \qquad (3)$$

مقدار ۵ ثانیه به این منظور به مدل اضافه شده است که در هر حال وجود تقاطع، حتی در زمانی که مدت زمان سبز بسیار زیاد باشد، باعث کاهش سرعت وسایل نقلیه می‌شود. همچنین با افزودن این مقدار به مدل، میانگین تأخیر برآوردشده به میانگین تأخیر مشاهده نزدیک‌تر می‌شود.

مدل ۲

هدف این بخش پرداخت تابعی است که تأخیر هر حرکت در هر تقاطع را به‌صورت جداگانه برآورد کند. در این بخش برای حرکت‌هایی که تداخل دارند (حرکت مستقیم می‌تواند با گردش به چپ روبرو، و حرکت گردش به چپ می‌تواند با حرکت مستقیم روبرو تداخل داشته باشد)، مدلی پیشنهاد می‌شود. شکل ریاضی مدل ۲ که به‌منظور برآورد تأخیر در حرکت‌های گردش به چپ و مستقیم هر تقاطع کالیبره می‌شود به‌صورت زیر است:

$$d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{w\times S})} + a(\frac{V}{Q})^b + h(\frac{V_c}{V}) \qquad (4)$$

که در آن، d و c و g وw و s و V و Q دارای همان تعاریف قبلی‌اند، و V_c حجم جریان ترافیک هم‌فاز متداخل با حرکت مورد نظر است. همچنین پارامتر h به پارامترهای مدل اضافه شده است. پرداخت مدل ۲ برای کل حرکت‌های تداخل‌دار و بدون تداخل به‌صورت جداگانه و در دو مرحله انجام شده است. در مرحله‌ی اول با ثابت قراردادن پارامتر b برابر ۲، سایر پارامترهای مدل پرداخت شده است. در جدول ۳ خلاصه‌ی نتایج مرحله اول پرداخت مدل ۲ در حرکت‌های مستقیم و گردش به چپ تمام ورودی‌های آمارگیری شده، گزارش شده است. در مرحله‌ی دوم با ثابت فرض کردن پارامتر a برابرمقادیر به دست آمده برای همه حرکت‌ها، تنها پارامتر مدل (یعنی h)، پرداخت شد. خلاصه‌ی نتایج این مرحله از پرداخت در جدول ۴ گزارش شده است. همان‌طور که در این

جدول ۲. نتایج مرحله نهایی پرداخت مدل ۱، و متوسط تأخیر مشاهده شده و برآورد شده در حرکت‌های آمارگیری شده.

حرکت‌ها	b	a	t_a	میانگین تأخیر مشاهده شده (ثانیه)	میانگین تأخیر برآورد شده (ثانیه)	تعداد مشاهدات	R^2
همه‌ی گردش به راست‌ها	۲	۳۲	۸٫۳	۹۰	۸۱	۱۲۷	۰٫۴۷
همه‌ی مستقیم‌ها	۲	۲۹	۱۶٫۹	۵۵	۵۱	۲۹۷	۰٫۷۶
همه‌ی گردش به چپ‌ها	۲	۳۶	۱۲٫۹	۸۳	۷۴	۱۸۸	۰٫۶۵
همه‌ی ورودی‌ها	۲	۳۲	۱۷٫۷	۵۶	۵۰	۳۴۶	۰٫۷۱

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج مرحله‌ی اول پرداخت مدل ۲.

حرکت‌ها		a	t_a	h	t_h	تعداد مشاهدات	R^2
بدون تداخل	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۳۰٫۹	۱۰٫۰	—	—	۱۱۹	۰٫۶۸
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۷٫۸	۱۳٫۰	—	—	۱۸۹	۰٫۷۴
با تداخل	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۶۸٫۸	۸٫۵	۲٫۳	۳٫۰	۶۹	۰٫۵۰
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۳٫۲	۱۳٫۰	۴٫۲	۱٫۵	۱۰۸	۰٫۶۱
همه‌ی حرکت‌ها	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۳۴٫۲	۱۲٫۴	۱۹٫۶	۲٫۴	۱۸۸	۰٫۶۴
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۸٫۶	۱۶٫۸	۴٫۶	۱٫۰	۲۹۷	۰٫۷۶

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج مرحله‌ی دوم پرداخت مدل ۲.

حرکت‌ها		a	h	t_h	تعداد مشاهدات	R^2
بدون تداخل	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۳۴٫۰	—	—	۱۱۹	۰٫۶۸
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۹٫۰	—	—	۱۸۹	۰٫۷۴
با تداخل	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۳۴٫۰	۱۹٫۶	۲٫۸	۶۹	۰٫۴۵
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۹٫۰	۴٫۶	۱٫۷	۱۰۸	۰٫۶۱
همه‌ی حرکت‌ها	همه‌ی گردش به چپ‌ها	۳۴٫۰	۱۹٫۶	۲٫۴	۱۸۸	۰٫۶۴
	همه‌ی مستقیم‌ها	۲۹٫۰	۴٫۶	۱٫۰	۲۹۷	۰٫۷۶

جدول مشاهده می‌شود، پارامتر h مربوط به همه‌ی مستقیم‌ها در همه‌ی حرکت‌ها در مدل ۲، آماره‌ی t کوچکی دارد. این به‌معنای معنی‌دار نبودن وجود متغیر $(\frac{V_c}{V})$ در مدل است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که به‌منظور برآورد تأخیر در حرکت‌های گردش به راست و مستقیم از مقادیر a و b به دست آمده از پرداخت مدل ۱، و به‌منظور برآورد تأخیر در حرکت‌های گردش به چپ از مقادیر a و b و h به دست آمده از پرداخت مدل ۲، استفاده شود. باتوجه به آنچه گذشت، مدل ۲ این نوشتار به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\text{مدل ۲}: d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{600w})} + a(\frac{V}{Q})^b + h(\frac{V_c}{V}) + 5 \quad (5)$$

که در آن مقدار پارامتر a برای حرکت‌های گردش به راست، مستقیم و گردش به چپ به‌ترتیب برابر ۳۲، ۲۹ و ۳۴ است. همچنین مقدار پارامتر b برای تمام حرکت‌ها برابر ۲ و مقدار پارامتر h برای حرکت‌های گردش به راست و مستقیم برابر صفر و برای حرکت گردش به چپ برابر ۲۰ است. دلیل افزودن مقدار ۵ ثانیه به مدل، مشابه مدل ۱ است. در پایان این بخش، مقایسه‌یی از برآورد متوسط زمان تأخیر در تقاطع‌های

جدول ۵. مقایسه‌ی برآورد متوسط زمان تأخیر توسط مدل‌های مختلف با مقادیر مشاهده شده.

نام تقاطع	متوسط زمان تأخیر تقاطع (ثانیه)			
	مشاهده شده	برآوردشده توسط HCM	برآورد شده توسط مدل ۱	برآورد شده توسط مدل ۲
ایوانک ـ فرحزادی	۱۱	۳۷	۱۳	۱۶
شریعتی ـ دولت	۵۸	۱۶۴	۴۹	۵۰
مجاهدین اسلام ـ ایران	۴۴	۵۳	۴۷	۴۲
رسالت ـ حسن‌بنا*	۱۶۵	۱۷۵	۱۷۹	۱۷۰
رسالت ـ اثنی عشری*	۱۲۴	۱۰۵	۱۱۹	۱۱۷

* تأخیرهای گزارش شده، فقط مربوط به ورودی حسن‌بنا و اثنی‌عشری هستند.

آمارگیری شده توسط مدل ۱، مدل ۲ و مدل HCM با مشاهدات زمان تأخیر، در جدول ۵ ارائه شده است. باتوجه به جدول ۵، مدل HCM در تقاطع‌هایی که دارای حجم زیاد گردش به چپ تداخل‌دار هستند (ایوانک ـ فرحزادی، شریعتی ـ دولت)، منجر به مقادیر زیاد تأخیر در کل تقاطع می‌شود.

تأثیر چراغ راهنمایی در مقدار تأخیر یک تقاطع

به‌منظور مقایسه‌ی تأخیر در یک تقاطع قبل و بعد از چراغ‌دار شدن، تأخیرهای مشاهده شده در تقاطع T شکل ایوانک ـ فرحزادی با تأخیرهای همین تقاطع در حالت بدون چراغ (این تقاطع قبلاً بدون چراغ بوده و اطلاعات مربوط به تأخیر و حجم در کلیه‌ی حرکت‌های این تقاطع در دسترس است.[۱۰]) مقایسه شده است.

خلاصه‌یی از نتایج این مقایسه در جدول ۶ گزارش شده است. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود، وجود چراغ به‌مقدار ۲۰ درصد تأخیر در تقاطع را افزایش داده است که این افزایش تأخیر عمدتاً ناشی از وجود چراغ است نه به دلیل افزایش حجم؛ زیرا حجم ترافیک ورودی به تقاطع قبل و بعد از چراغ‌دار شدن تغییر محسوسی (به جز در ورودی غربی) نکرده است. این افزایش تأخیر در بعضی حرکت‌ها (مانند حرکت مستقیم جنوب به شمال) خیلی بیشتر از بقیه‌ی حرکت‌ها است، چون در این حرکت در صورت نبودن چراغ، وسایل نقلیه در تمام زمان‌ها بدون مزاحمت (ترافیک تداخلی) عبور می‌کنند. در حالی که در صورت وجود چراغ، وسایل نقلیه در مدت زمانی که چراغ قرمز است توقف می‌کنند. همچنین در بعضی حرکت‌ها مانند حرکت گردش به چپ در جنوب به غرب، وجود چراغ باعث کاهش تأخیر شده‌است؛ زیرا وجود چراغ باعث ایجاد نظم شده و از تعداد حرکت‌های تداخلی با این حرکت کاسته است. به‌طور کلی این مقدار افزایش تأخیر برای تقاطع‌هایی که حجم ترافیک سبک دارند، صادق است و هر چه تقاطع شلوغ‌تر شود، این مقدار کم‌تر می‌شود. در واقع وقتی تقاطع شلوغ شود، وجود چراغ باعث کاهش تأخیر در تقاطع خواهد شد.

در آخرین قسمت این نوشتار عملکرد یک سیستم هوشمند چراغ راهنمایی در یک تقاطع چراغ‌دار مورد ارزیابی قرارگرفته است. بدین‌منظور اطلاعات مربوط به حجم ترافیک و زمان سفر کلیه حرکت‌های تقاطع و زمان‌بندی چراغ در تقاطع مطهری ـ قائم مقام فراهانی جمع‌آوری شد. در این تقاطع در بازه‌هایی از آمارگیری، چراغ توسط مأمور راهنمایی و رانندگی به‌صورت دستی کنترل می‌شد. از آنجا که هدف این قسمت ارزیابی سیستم هوشمند است، اطلاعات مربوط به این بازه‌ها، در ارزیابی استفاده نشدند. لازم به توضیح است که این تقاطع به‌صورت سه‌فازه عمل می‌کند. در فاز ۱ کلیه حرکت‌های ورودی غربی تقاطع، در فاز ۲ کلیه‌ی حرکت‌های ورودی جنوبی تقاطع، و در فاز ۳ کلیه‌ی حرکت‌های ورودی شمالی تقاطع انجام می‌شود. به‌منظور برآورد مقدار تأخیر، در حالتی که چراغ دارای زمان‌بندی ثابت باشد، از میانگین حجم ترافیک ساعتی، در دوره‌یی که چراغ به‌صورت خودکار عمل می‌کند، استفاده شده است. همچنین طول زمان سبز و طول چرخه‌ی استفاده شده برای برآورد مقدار تأخیر، برابر متوسط طول زمان سبز و طول چرخه در دوره‌هایی که چراغ به‌صورت خودکار عمل می‌کند فرض شده است. بنابراین طول زمان سبز در فاز ۱ برابر ۷۰ ثانیه، در فاز ۲ برابر ۲۲ ثانیه، در فاز ۳ برابر ۴۱ ثانیه و طول چرخه برابر ۱۳۳ ثانیه فرض شده است. در جدول ۷، خلاصه‌ی اطلاعات مربوط به دوره‌ی خودکار بودن چراغ و میانگین تاخیر برآورد شده توسط مدل ۲ این نوشتار در تقاطع مطهری ـ قائم مقام فراهانی گزارش شده است. چنان که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، وجود چراغ هوشمند در این تقاطع و تغییرات طول زمان سبز و طول چرخه در ورودی‌های این تقاطع باعث کاهش ۲۰ درصدی تأخیر شده است. این کاهش در ورودی غربی کم‌تر از بقیه‌ی ورودی‌ها است. دلیل آن، این است که این ورودی در تمام مدت آمارگیری حجم ترافیک بسیار زیادی دارد و زمان سبز در این ورودی تغییرات زیادی ندارد.

جدول ۶. تغییرات نسبی برخی کمیت‌ها بعد از چراغ‌دار شدن تقاطع ایوانک ـ فرحزادی، به تفکیک حرکت‌های تحت تأثیر چراغ.

حرکت / کمیت	ورودی غربی		ورودی جنوبی			ورودی شمالی		کل تقاطع
	خروجی شمالی	کل	خروجی شمالی	خروجی غربی	کل	خروجی جنوبی	کل	
متوسط حجم ترافیک	۱٫۳	۱٫۳	۱٫۰	۱٫۱	۱٫۰	۰٫۹	۰٫۹	۱٫۰
متوسط تأخیر	۱٫۶	۱٫۶	۱٫۹	۰٫۹	۱٫۱	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۲

جدول ۷. خلاصه اطلاعات مربوط به دوره خودکار بودن چراغ در تقاطع مطهری ـ قائم مقام فراهانی.

ورودی	متوسط حجم ترافیک (همسنگ سواری در ساعت)	تأخیر مشاهده شده (ثانیه)		تأخیر برآورد شده (ثانیه) توسط مدل ۲		نسبت تأخیر برآورد شده به مشاهده شده	
		ورودی	تقاطع	ورودی	تقاطع	ورودی	تقاطع
غربی	۶۳۵۰	۵۸	۵۸	۶۶	۷۲	۱٫۱۴	۱٫۲۰
جنوبی	۹۰۰	۶۸		۹۰		۱٫۳۲	
شمالی	۱۶۸۰	۵۱		۸۱		۱٫۵۹	

نتیجه‌گیری

هدف این نوشتار ساخت مدلی برای برآورد زمان تأخیر برای هر یک از ورودی‌های یک تقاطع و هر یک از حرکت‌های یک ورودی به یک تقاطع با چراغ راهنمایی بود. برای این منظور در ۵ تقاطع شهر تهران آمارگیری‌های حجم ترافیک و زمان سفر وسایل نقلیه و نیز زمان‌بندی چراغ انجام شد. در این نوشتار دو مدل مختلف به‌منظور برآورد تأخیر در تقاطع چراغ‌دار ساخته شد. مدل اول که ساختار آن در مطالعات جامع حمل و نقل مشهد پیشنهاد شده است، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده دوباره پرداخت شده و مقادیر جدیدی برای پارامترهای آن تخمین زده شد. این مدل مقدار تأخیر هر ورودی را تابعی از کل حجم ترافیک خیابان ورودی به تقاطع، عرض سواره‌رو خیابان ورودی، و طول چرخه و زمان سبز آن ورودی در نظر می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی این مدل قابلیت استفاده از آن در نرم‌افزارهای موجود تخصیص ترافیک، و نیاز به اطلاعات کم‌تر و سادگی آن است. مدل دوم که دارای ساختار جدیدی است و به‌طور جداگانه برای هر نوع حرکت یک ورودی ساخته شده است، تأخیر حرکت گردش به چپ را تابعی از مقدار حجم ترافیک تداخلی نیز می‌داند. شاید به نظر برسد که دو مدل گزارش شده در این نوشتار، عملکرد یکسانی دارند. ولی با کمی تأمل به این نتیجه می‌رسیم که مدل دوم از عملکرد بهتری برخوردار است. چون اولاً حجم ترافیک تداخلی را به‌عنوان عامل مؤثر در مقدار تأخیر حرکت گردش به چپ می‌شناسد و ثانیاً برای هر حرکت تقاطع به طور جداگانه ساخته شده است.

در قسمت بعدی این مطالعه اثر وجود چراغ در مقدار تأخیر یک تقاطع ارزیابی شد. برای این منظور تقاطع T شکل ایوانک ـ فرحزادی، که قبلاً بدون چراغ بوده، انتخاب شد و اطلاعات مربوط به حجم ترافیک و زمان تأخیر در کلیه حرکت‌های تقاطع و نیز زمان‌بندی آنها گردآوری شد. پس از ارزیابی مشخص شد که وجود چراغ در این تقاطع باعث افزایش ۲۰ درصدی تأخیر شده است. این افزایش تأخیر در حرکت‌هایی که در حالت بدون چراغ با حرکت دیگری تداخل ندارند بیشتر از بقیه حرکت‌هاست. همچنین در بعضی از حرکت‌ها وجود چراغ باعث کاهش تأخیر شده‌است، چون وجود آن باعث ایجاد نظم شده و از تعداد حرکت‌های متداخل با این حرکت‌ها می‌کاهد.

در آخرین قسمت، تأثیر وجود یک سیستم هوشمند چراغ راهنمایی در یک تقاطع چراغ‌دار مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور کلیه‌ی اطلاعات مربوط به حجم ترافیک و زمان سفر تمام حرکت‌های تقاطع و زمان‌بندی چراغ در تقاطع مطهری ـ قائم مقام فراهانی جمع‌آوری شد. پس از ارزیابی مشخص شد که وجود چراغ هوشمند در این تقاطع و تغییرات طول زمان سبز و طول چرخه در ورودی‌های این تقاطع باعث کاهش ۲۰ درصدی تأخیر شده است. این کاهش تأخیر در ورودی‌هایی که حجم ترافیک بسیار زیادی دارند کم‌تر است. دلیل آن، این است که حجم زیاد ترافیک در این ورودی‌ها باعث کاهش تغییرات زمان سبز در این ورودی‌ها می‌شود.

منابع

۱. ذکایی‌آشتیانی، هدایت و پورزاهدی، حسین. «مدل تخصیص ترافیک و سیمای ترافیک اصفهان»، مطالعات جامع حمل و نقل شهری اصفهان، سازمان حمل ونقل و ترافیک اصفهان (۱۳۶۹).

2. Cesar A. Q. and D. Bullock. "Measuring control delay at signalized intersection", *Journal of Transportation Engineering*, **125** (4), pp. 271-279 (1999).

3. Mcshane W. and Roess, R. "Traffic engineering", Prentice Hall, New Jersey (1990).

4. Highway Capacity Manual, TRB. Up Date, Special Report 209, Washing, D.C. (1994).

5. Janice D., Fambro, D.B. and Rouphail. N.M. "Accounting for nonrandom arrivals in estimate of delay at signalized intersections", Transportation Research Record, 1555, pp. 9-16 (1998).

6. Stephen M. B. and Ivan, J. N. "Estimating intersection approach delay using 1985 and 1994 highway capacity manual procedures", Transportation Research Record, 1555, pp. 23-32 (1998).

۷. «تابع زمان تأخیر در تقاطع‌های با چراغ راهنمایی»، مطالعات جامع حمل و نقل مشهد، گزارش ۵-۷۵، مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۵).

۸. «ساختار نهایی مدل حمل و نقل شهر تهران در محیط نرم‌افزار EMME/۲»، گزارش ۱۱۷، شرکت مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک تهران (۱۳۷۵).

۹. مظلومی، احسان. «تابع تأخیر برای تقاطع‌های با چراغ راهنمایی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۲).

۱۰. شهپر، امیرحسین. «تابع تأخیر تقاطع‌های بدون چراغ»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۱).