

مدلسازی تأخیر تقاطعهای چراغدار در حالت فوق اشباع

چکیده

محاسبه زمان تأخیر و شناخت آن در تقاطعهای چراغدار که خود از مهمترین ارکان سیستم حمل و نقل شهری محسوب می‌شود، از آنجا که بر میزان اتلاف وقت افراد، هزینه مصرف سوخت، آلودگی هوا و در کل بر هزینه استفاده از شبکه موثر است، در مطالعات ترافیک از جایگاه خاصی برخوردار است. در این تحقیق به محاسبه زمان تأخیر در تقاطعهای چراغدار در حالت فوق اشباع پرداخته می‌شود. این بررسی بر مبنای اطلاعات جمع‌آوری شده از دو تقاطع در شهر تهران بوده و مهمترین نتیجه این تحقیق، یافتن رویکرد مناسبی برای تخمین تأخیر فوق اشباع در شرایط ایران است. در این مقاله، تلاش شده که با بررسی چند مدل پیشنهادی برآورد تأخیر و مقایسه آن با شرایط میدانی، مدل مناسبی برای برآورد تأخیر تقاطعهای چراغدار در حالت فوق اشباع ارائه گردد. نتایج نشان می‌دهد که از بین ۲۰ مدل بررسی شده، تنها سه مدل برازش معنی داری به آمار جمع‌آوری شده داشتند.

کلید واژه ها: مدل‌سازی^۳، تأخیر^۴، تقاطع چراغدار^۵، فوق اشباع^۶

۱. مقدمه

۱. کارشناس سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری مشهد masoud_n1979@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، nassiri@sharif.edu

۳. Modeling

۴. Delay

۵. Signalized Intersection

۶. Over-Saturated

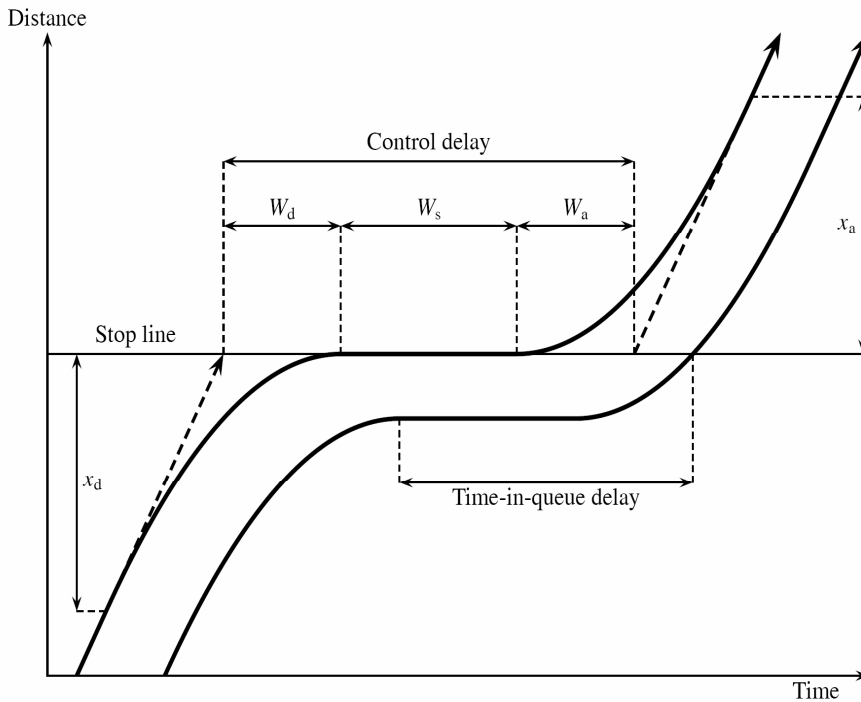
امروزه با افزایش جمعیت و همچنین بالا رفتن سرانه مالکیت اتومبیل، معضلی به نام ترافیک، در بیشتر شهرهای بزرگ دیده می‌شود. یکی از عوامل افزایش زمان سفر خیابانهای شهری، وجود تقاطعهای چراغدار است. تقاطعهای چراغدار نقاط کنترل کننده جریان ترافیک در سطح شبکه هستند که مقدار تأخیر در آنها معیار اندازه‌گیری مناسبی است که برای بیان خصوصیات عملکردی تقاطع چراغدار به کار می‌رود [Kang, 2000].

تأخیر در حالت کلی عبارت است از زمان اضافی لازم برای گذر از مسافتی که در آن طول، عاملی از حرکت جریان ممانعت می‌کند؛ لذا وجود چراغ راهنمایی در تقاطع، از مهمترین عوامل در شکل‌گیری جریان متقاطع^۱ است [TMartin, 2003]. هنگامی که حجم رویکردهای یک تقاطع چراغدار افزایش می‌یابد و از ظرفیت آن تجاوز می‌کند، در ورودیهای تقاطع بتدریج صف تشکیل می‌شود و این شرایط تا زمانی که تقاضای وسایل نقلیه برای عبور، در رویکردهای تقاطع کاهش پیدا نکند، ادامه می‌یابد. در این حالت تقاطع را فوق اشباع می‌گویند [Kamarajugadda, 2003].

۲. تعریف مسئله

تأخیر در تقاطعهای چراغدار، مطابق شکل (۱)، اختلاف زمان سفر بین دو حالتی است که وسیله نقلیه بدون تأثیر پذیری از وجود چراغ راهنمایی از تقاطع گذر می‌کند و حالتی که چراغ راهنمایی در حرکت وسیله نقلیه مؤثر شده و باعث حرکت کند و توقف وسیله نقلیه می‌شود که شامل زمانهای کاهش سرعت، حرکت در صف، توقف و افزایش سرعت است [TRB, 2000].

۱ Interrupted Flow



شکل (۱): نمودار تأخیر در تقاطع‌های چراغدار [۴]

محاسبه زمان تأخیر در تقاطع‌ها به دلیل وابسته بودن به زمان و پیچیدگی ماهیت تشکیل صف، در تقاطع‌های فوق‌اشباع همواره مشکل بوده است [Fu, ۲۰۰۰]. روش‌های متعددی برای ارزیابی و محاسبه زمان تأخیر در تقاطع‌های فوق‌اشباع به وجود آمده که هر یک مبتنی بر فرضیات خاصی می‌باشد که در بیشتر اوقات جواب‌های مناسبی برای شرایط ایران، ارایه نمی‌دهند [امینی، ۱۳۸۴]. لذا پیشنهاد مدلی برای تخمین تأخیر در تقاطع‌های فوق‌اشباع که بیشتر به رفتار رانندگان و شرایط کشور ما شبیه است؛ مسئله‌ای است که هدف این تحقیق می‌باشد.

۳. مروری بر منابع

۳-۱. مدل وبستر

اولین مدل شاخص برآورد تأخیر، مدل وبستر است. وبستر میانگین تأخیر را در شرایط پایدار، مجموع دو عامل تأخیر یکنواخت و اتفاقی دانست و نتایج مطالعات خود را در قالب معادله (۱) ارائه داد [Webster, ۱۹۵۸ و Webster, ۱۹۶۶].

$$w = w_u + w_D = \frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{q}{s}\right)} + \frac{\rho^2}{2q(1-\rho)} \quad (1)$$

او با مقایسه نتایج معادله (۱) با مشاهدات میدانی، به این نتیجه رسید که مقادیر به دست آمده از این معادله تا حدی دست بالا است. بنابراین با وارد کردن جمله سوم (۲) که به صورت تجربی به دست آمد و حدود ۵ تا ۱۵ درصد کل زمان تأخیر محاسبه شده است، معادله خود را تصحیح کرد.

$$w = \frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{q}{s}\right)} + \frac{\rho^2}{2q(1-\rho)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} \rho^{2+\frac{5g}{c}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، جمله اول نشان‌دهنده تأخیر متوسط با فرض ورود یکنواخت وسایل نقلیه است. در جمله دوم تأخیر اضافه‌ای که به دلیل عدم یکنواختی ورود وسایل نقلیه به وجود می‌آید، محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده احتمال ورود وسایل نقلیه در هر لحظه است که گاهی اوقات باعث بروز وضعیت فوق اشباع در تقاطع می‌گردد؛ و در نهایت جمله سوم عامل تعدیل^۱ و ضریبی نیمه تجربی^۲ است که مدل را با شرایط واقعی تطبیق می‌دهد. همان طور که ذکر شد چون معادله (۱) تا اندازه ای تأخیر تصادفی را

۱. Adjustment Factor

۲. Semi-Empirically

بیش از حد واقعی تخمین می‌زند، وبستر پیشنهاد کرد که کل تأخیر (مجموع تأخیر یکنواخت و تصادفی) به صورت معادله (۳) تخمین زده شود.

$$w = 0.9(w_u + w_D) = 0.9 \left[\frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{q}{s}\right)} + \frac{\rho^2}{2q(1-\rho)} \right] \quad (3)$$

بعد از تحقیقاتی که وبستر انجام داد، مدل‌های بسیاری با استفاده از اصول آنالیز صف توسط هاردل^۱، تپلی^۲ و اکلیک^۳ ارائه شدند [Hurdle, ۱۹۸۴ و Akcelik, ۱۹۸۸ و Teply, ۱۹۸۹ و Akcelik, ۱۹۹۳]. این مدل‌ها شامل فرضیات زیر هستند [Kang, ۲۰۰۰]:
 وسایل نقلیه قادرند به طور آنی شتاب خود را کاهش یا افزایش دهند؛
 وسایل نقلیه در هر بازه زمانی تحلیل، با نرخ میانگین ثابتی به تقاطع می‌رسند؛
 الگوی ورود وسایل نقلیه از توزیع پواسون^۴ پیروی می‌کند؛
 سیستم به صورت FIFO^۵ است؛
 هر ورودی به صورت صف تک‌کاناله است.

۳-۲. مدل هاردل

در مدل تک‌میلی هاردل تأخیر فوق اشباع میانگین به صورت معادله (۴) تخمین زده می‌شود

[McShane, ۲۰۰۴]:

-
۱. Hurdle
 ۲. Teply
 ۳. Akcelik
 ۴. Poisson Distribution
 ۵. First In First Out

$$w = w_u + w_o = \frac{1}{2}[(c - g) + t(\rho - 1)] \quad (4)$$

۳-۳- مدل آیین نامه ظرفیت کانادا ۱۹۹۵

در این آیین نامه که نتیجه فعالیتهای تپلی بود، تأخیر میانگین ۱ وسایل نقلیه، به وسیله معادله (۵) محاسبه می شود [ITE, ۱۹۹۵]:

$$d = d_1 \times k_f + d_2 \quad (5)$$

در معادله (۵) d تأخیر ناشی از سیستم کنترل برای هر وسیله نقلیه (بر حسب ثانیه بر وسیله)، تأخیر یکنواخت برای هر وسیله نقلیه با فرض تقاضای یکنواخت (ورود یکنواخت)، k_f ضریب تعدیل پیشروی^۲ که بیشتر در تقاطعهای هماهنگ^۳ نمود پیدا می کند و d_2 تأخیر اتفاقی و اضافی^۴ است.

۱. Average Delay per Vehicle for a Lane Group

۲. djustment factor for the effect of the quality of progression

۳. Coordinated Signals

۴. Incremental, or random delay

$$d_1 = 0.5c \frac{\left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{\left(1 - \text{Min}(1, X) \frac{g}{c}\right)} \quad (6)$$

$$d_2 = 15t_e \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{240X}{C.t_e}} \right] \quad (7)$$

$$k_f = \frac{\left(1 - \frac{q_{gr}}{q}\right) f_p}{1 - \frac{g}{c}} \quad (8)$$

در معادلات (۶)، (۷) و (۸)؛ c طول چرخه (بر حسب ثانیه)، g زمان سبز مؤثر (بر حسب ثانیه)، X نسبت $\frac{V}{C}$ یا درجه اشباع و C ظرفیت (بر حسب معادل سواری در ساعت) است. t_e زمان ارزیابی و آنالیز (بر حسب دقیقه)، q_{gr} درصد وسایل نقلیه‌ای که در فاز سبز به تقاطع می‌رسند^۱ (بر حسب معادل سواری در ساعت)، q حجم ورودی (بر حسب معادل سواری در ساعت) و f_p ضریب تعدیل مکمل^۲ (برای در نظر گرفتن اثر وسایل نقلیه‌ای که در فاز سبز به صورت دسته‌ای به تقاطع می‌رسند) است.

۳-۴- مدل آیین نامه استرالیا^۳

در این آیین‌نامه که نتیجه فعالیت‌های اکلیک و دیگران بود، تأخیر میانگین وسایل نقلیه در حالت فوق اشباع، به وسیله معادله (۹) محاسبه می‌شود. [Akçelik, ۱۹۸۰]:

۱. Arrival flow during the green interval
۲. Supplemental adjustment factor
۳. Australian Road Capacity Guide

$$d = d_u + d_o = c \frac{(1 - g_e)}{2} + \frac{T}{4} \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \left(\frac{12(X-X_o)}{CT} \right)} \right]$$

$$X_o = 0.67 + \left(\frac{sg}{600} \right) \quad \text{و} \quad X \leq X_o \quad (9)$$

در معادله (۹)، T مدت زمان تحلیل (بر حسب ساعت) و S نرخ جریان اشباع (بر حسب وسیله نقلیه در هر ثانیه زمان سبز) است و بقیه پارامترها مشابه معادلات (۶)، (۷) و (۸) هستند.

۳-۵- آیین نامه ظرفیت بزرگراههای آمریکا ۲۰۰۰

بعد از انتشار این آیین نامه در سال ۱۹۹۴، تحقیقات زیادی برای ارزیابی تغییرات محاسبه تأخیر انجام شد. دانیل و همکارانش^۱ در سال ۱۹۹۶، اثرات عدم ورود اتفاقی^۲ وسایل نقلیه را بر فرض ورود اتفاقی وسایل نقلیه مورد بررسی قرار دادند. براون و ایوان^۳ و همچنین پرودروس و کوگا^۴ در سال ۱۹۹۶ مدلهای محاسبه تأخیر این آیین نامه در سال ۱۹۸۵ و ۱۹۹۴ را با برداشتهای میدانی مقایسه کردند؛ و در یک تحقیق دیگر اکلین نیز در همان سال با بسط ضریب تعدیل پیشروی^۵ مدل سال ۱۹۹۴، تخمینی از طول صف ارائه داد [Kang, ۲۰۰۰]. فامبرو و رافائل^۶ در سال ۱۹۹۷ نهایتاً با پیشنهاد یک مدل عمومی برای محاسبه تأخیر، تصحیحاتی را در مدل سال ۱۹۹۴ اعمال کردند که در مدل سال ۲۰۰۰، این اصلاحات اعمال شده است [Fambro, ۱۹۹۷]. در این آیین نامه تأخیر میانگین وسایل نقلیه، به وسیله معادلات (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) محاسبه می شود [TRB, ۲۰۰۰]:

-
۱. Daniel et al. (۱۹۹۶)
 ۲. Non-Random Arrivals
 ۳. Braun and Ivan (۱۹۹۶)
 ۴. Prevedouros and Koga (۱۹۹۶)
 ۵. Progression Factor (PF)
 ۶. Fambro and Roupail (۱۹۹۷)

$$d = d_1 \times (PF) + d_2 + d_3 \quad (10)$$

$$d_1 = 0.5C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{\left(1 - \text{Min}\left(1, X\right) \frac{g}{C}\right)} \quad (11)$$

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad (12)$$

$$PF = \frac{(1-P)f_p}{1 - \frac{g}{C}} \quad (13)$$

در معادله (۱۰) تا (۱۳) d تأخیر ناشی از سیستم کنترل برای هر وسیله نقلیه (بر حسب ثانیه بر وسیله)، d_1 تأخیر یکنواخت برای هر وسیله نقلیه با فرض تقاضای یکنواخت (ورود یکنواخت)، d_2 تأخیر اتفاقی و اضافی (بر حسب ثانیه بر وسیله) ناشی از تغییرات در نرخ جریان ورودی (ورودیهای اتفاقی) و تأخیر ناشی از عدم امکان تخلیه تمامی جریان ورودی در دوره مربوطه به علت جریان بیش از ظرفیت و d_3 تأخیر ناشی از صف اولیه در شروع دوره تجزیه و تحلیل است.

k ضریب تأخیر اضافی (وابسته به وضعیت کنترل چراغ راهنمایی) که عدد ۰/۵ برای چراغ راهنمایی از پیش زمان‌بندی شده^۱ و برای چراغ راهنمایی هوشمند این ضریب بین ۰/۵ و ۰/۴ متغیر است. I ضریب پیمایش نسبت به چراغ راهنمایی بالادست جریان ترافیک^۲ است که برای تقاطع منفرد عدد ۱/۰ فرض می‌شود.

P درصد وسایل نقلیه‌ای که در فاز سبز به تقاطع می‌رسند؛ f_p ضریب تعدیل مکمل و بقیه پارامترها مشابه معادله (۲-۴۴) است. PF ضریب تعدیل پیشروی^۳ است که در آنالیز تقاطع‌های هماهنگ استفاده می‌شود. ضریب تعدیل پیشروی، اثر چراغ‌های راهنمایی هماهنگ با هم و کنترل

-
۱. Pre-timed Signals
 ۲. Upstream Filtering/Metering Adjustment Factor
 ۳. Progression adjustment Factor

کننده جریان را بر روند و کیفیت تردد وسایل نقلیه بین آنها محاسبه می‌کند؛ که این تخمین بر اساس الگوی ورود وسایل نقلیه است.

ضریب تعدیل پیشروی بیشتر وقتی مطرح است که فاصله بین دو تقاطع چراغدار به حدی باشد (کمتر از ۳/۲ کیلومتر) که فزبندی و زمان‌بندی چراغ راهنمایی بالادست جریان، بر کیفیت تردد و روند حرکتی جریان ترافیکی که به چراغ راهنمایی مورد مطالعه می‌رسند، تأثیرگذار باشد. حال اگر ضریب تعدیل پیشروی نامناسب باشد، نشان‌دهنده آن است که درصد کمی از وسایل نقلیه در فاز سبز به تقاطع می‌رسند و در این حالت ضریب تعدیل پیشروی بیشتر از ۱/۰ است. به همین نسبت اگر ضریب تعدیل پیشروی کمتر از ۱/۰ باشد نشان‌دهنده ورود وسایل نقلیه با درصد مناسبی در فاز سبز است.

۳-۶. مدل برآورد تأخیر ممتحن^۱

مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۷۵ برای تخمین تأخیر در تقاطعهای چراغدار معادله (۲-۵۳) را بر اساس مدل وبستر پیشنهاد کرد [ممتحن، ۱۳۷۵]. در معادله (۲-۵۳)، c طول دوره تناوب چراغ (بر حسب ثانیه)، g^e زمان سبز موثر (بر حسب ثانیه)، V تقاضا جریان ترافیک در رویکرد مورد نظر (همسنگ سواری در ساعت)، W عرض خیابان در رویکرد مورد نظر (بر حسب متر) و پارامتر s نرخ تخلیه (بر حسب وسیله نقلیه همسنگ سواری برای یک متر عرض عبوری در ساعت) است و مقدار آن برای معابر مختلف، عددی بین ۳۵۰ تا ۴۴۰ و ضریب a نیز بین ۲۵ تا ۴۵ در حال تغییر است. لازم به ذکر است در مطالعات جامع حمل و نقل شهر مشهد، میزان پارامتر s ۴۲۰ و ضریب a عدد ۴۳/۴ با شاخص برازندگی ۰/۵۰ برآورد شد.

$$d = \left[\frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{s \times W})} + a \left(\frac{V}{\left(\frac{g}{c}\right) \times (s \times W)} \right)^2 \right] \quad (2-53)$$

۳. آمارگیری

۳. مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف

یکی از مهمترین عناصر مدل‌سازی، اطلاعات ورودی است. برای گردآوری اطلاعات تقاطع‌هایی براساس ملاک‌های مشخص مانند شیوه کنترل و درجه اشباع در سطح شهر انتخاب شد و اطلاعات لازم از این تقاطع‌ها جمع‌آوری گردید. در این تحقیق تقاطع‌های با چراغ راهنمایی زمان‌ثابت و با درجه اشباع بزرگتر از واحد انتخاب شدند، زیرا هدف از این تحقیق ارائه مدل برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغدار در حالت فوق‌اشباع بود.

این اطلاعات شامل شرایط هندسی، اطلاعاتی در مورد نحوه عملکرد چراغ راهنمایی و شرایط ترافیکی است [TRB, 2000]؛ که در قالب آماربرداری از تقاطع‌ها، این اطلاعات گردآوری شدند. برای اندازه‌گیری زمان سفر شیوه‌های مختلفی از جمله روش وسیله نقلیه آزمایشی^۱، شیوه ثبت پلاک وسایل نقلیه، شمارش وسایل نقلیه متوقف^۲ و روش‌های دقیقی مانند استفاده از روش فیلمبرداری از تقاطع وجود دارد. روش استفاده شده در این مطالعه، شیوه فیلم‌برداری می‌باشد؛ که انتخاب این روش به دلیل دقت بالای آمار و همچنین قابل دسترس و مستند بودن آن است.

حجم ترافیک یکی از مهمترین اطلاعات برای تحلیل تقاطع‌های چراغدار است. در تقاطع‌های چراغدار حجم به دو قسمت اصلی عرضه و تقاضا تقسیم می‌گردد. منظور از عرضه در این پژوهش، تعداد وسایل نقلیه خروجی از تقاطع است که این تعداد، علاوه بر وابسته بودن نسبت به عرض رویکرد، بستگی به زمان‌بندی و فازبندی تقاطع دارد و تقاضا، حجم وسایل نقلیه‌ای است که قصد عبور از هر یک از رویکردهای تقاطع را دارند.

هنگامی که نسبت حجم به ظرفیت (X) کوچکتر از ۱ باشد، حجم‌های ورودی (تقاضا) با حجم‌های خروجی (عرضه) کمتر یا مساوی ۱ هستند. هنگامی که نسبت حجم به ظرفیت (X) بزرگتر از ۱ باشد، حجم‌های خروجی کمتر از حجم‌های ورودی است و نمی‌توان حجم‌های خروجی را بنای تجزیه و تحلیل قرار داد [TRB, 2000]. در نتیجه کلیه محاسبات باید بر پایه احجام ورودی (تقاضا) صورت گیرد. در آمارگیری علاوه بر شمارش تعداد وسایل نقلیه خروجی از تقاطع به تفکیک نوع حرکت، تعداد وسایل نقلیه ورودی به تقاطع در انتهای صف رویکرد نیز در زمان آمارگیری به دست آمد.

۱. The Floating Car Method

۲. Average Stopped Delay

۴. مدل سازی

۴-۱. معرفی متغیرها در ساخت مدل

متغیرهای مستقل به کار رفته در ساخت مدلها عبارتند از طول دوره تناوب چراغ راهنمایی بر حسب ثانیه (C) و طول دوره سبز موثر بر حسب ثانیه برای رویکرد مورد نظر (g_c)، کل حجم جریان ترافیک در خیابان ورودی بر حسب وسیله نقلیه سواری در ساعت (V) که به صورت همسنگ معادل سواری محاسبه شده است.

دیگر متغیرهای مستقل به کار رفته در ساخت مدلها عبارتند از عرض خیابان ورودی بر حسب متر (W)، نرخ تردد اشباع پایه در هر متر عرض خیابان بر حسب وسیله نقلیه سواری در ساعت (S) که مقدار ۴۲۰ فرض می شود [ممتحن، ۱۳۷۵]؛ و نزدیک به عدد ۴۲۸ است که برای شرایط ایران پیشنهاد شده است [آیین نامه ۱۴۵-۱، ۱۳۷۵]. همچنین ظرفیت خیابان ورودی بر حسب وسیله نقلیه سواری در ساعت (C) که حاصل معادله (۱) و درجه اشباع (x) که نتیجه معادله (۲) می باشد، در مدل سازی به عنوان متغیرهای مستقل تلقی می شوند:

$$C = \frac{g}{c} \times s \times W \quad (1)$$

$$x = \frac{V}{C} = \frac{V}{\left(\frac{g}{c} \times s \times W\right)} \quad (2)$$

لازم به ذکر است هر چند متغیرهایی مانند طول سیکل و زمان سبز هر یک از رویکردها، بر پایه میزان تقاضای ورودی در هر خیابان و ظرفیت معبر تعیین شده اند، اما چون چراغ راهنمایی به صورت از پیش زمان بندی شده کار می کند، لذا کارکرد آنها به صورت متغیرهای مستقل است. متغیر وابسته ای ۱ که در ساخت مدلها می توان به کار برد، زمان تأخیر مشاهده شده (d_{Observed}) است. مطابق معادله (۳) زمان تأخیر را می توان به دو قسمت تقسیم کرد؛ که قسمت اول (d_۱) مربوط به تأخیر یکنواخت و قسمت دوم (d_۲) در ارتباط با تأخیر فوق اشباع است. از آنجا که تأخیر یکنواخت در مدلها (d_۱)،

۱. Dependent Variable

مطابق معادله (۴)، نصف زمان قرمز برای هر ورودی در نظر گرفته می‌شود، لذا می‌توان متغیر وابسته برای ساخت مدلها را تنها قسمت دوم معادله تأخیر دانست که از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$d = d_1 + d_2 \quad (۳)$$

$$d_1 = \frac{(c - g_e)}{2} \quad (۴)$$

$$d_2 = d_{\text{observe}} - d_1 \quad (۵)$$

۴-۲. معرفی مدلها

در این مرحله پس از معرفی کلیه متغیرها که در ساخت مدلها از آنها استفاده خواهد شد، روند انجام مدل‌سازی گروه‌های مختلف شرح داده می‌شود. در این پژوهش ۲۰ مدل در قالب ۷ گروه آرایه خواهد شد و برای یافتن پارامترهای هر یک از مدلها، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، رگرسیون داده‌ها انجام می‌شود.

در اولین گروه از مدل‌های پیشنهادی، هدف تعیین پارامتر مدل با توجه به تغییرات توان X است و در گروه دوم، به جای تغییر توان (X) ، توان $(X-1)$ افزایش می‌یابد؛ که معادله‌های گروه اول و دوم در جدول (۱) گزارش شده‌اند. در این دو گروه، توانهای n ام (X) و $(X-1)$ به عنوان متغیر مستقل و d_2 که حاصل معادله (۵) است، به عنوان متغیر وابسته فرض می‌شود.

در گروه سوم تعیین پارامترها در چندجمله‌ای‌های بر حسب (X) هدف است و در گروه چهارم که شبیه گروه سوم است، هدف تعیین پارامترها در چندجمله‌ای‌های بر حسب $(X-1)$ است. معادله‌های گروه سوم و چهارم در جدول (۲) گزارش شده است. در این دو گروه از مدلها نیز، توانهای n ام (X) و $(X-1)$ به عنوان متغیر مستقل و d_2 ، به عنوان متغیر وابسته فرض شده؛ با این تفاوت نسبت به دو گروه قبل که در گروه‌های اول و دوم، تنها یک جمله از توان‌های n ام (X) و $(X-1)$ به عنوان متغیر وابسته وجود داشت، اما در گروه‌های سوم و چهارم چندجمله‌ای‌های بر حسب توانهای n ام (X) و $(X-1)$ به عنوان متغیر وابسته استفاده می‌شود.

جدول (۱) خلاصه نتایج آماری پرداخت مدل‌های گروه اول و دوم

مدل	مقدار پارامتر a	آماره t	R^2
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax$	۱۴۱/۱۵	۴۵/۴۷	منفی
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^2$	۹۶۶۵	۶۴/۱۳	۰/۵۱
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^3$	۶۵/۳۹	۶۸۷۴	۰/۷۹
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^4$	۴۳/۷۵	۵۱/۵۷	۰/۸۷
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)$	۴۴۷/۲۶	۶۴/۵۵	۰/۷۸
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^2$	۸۷۶/۰۴	۲۶/۶۰	۰/۵۹
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^3$	۱۶۰۹/۳۷	۱۶/۵۲	۰/۲۳
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^4$	۲۷۴۸/۷۵	۱۱/۶۵	منفی

گروه پنجم مدل‌سازی، یافتن پارامترها در مدل‌های ریاضی سه سطر اول جدول (۳) مد نظر است و در گروه ششم، هدف تعیین پارامترها در مدل‌های ریاضی سه سطر آخر جدول (۳) است. همان طور که در این جدول مشخص است، تفاوت این دو گروه در استفاده از (x) و $(x-1)$ به عنوان متغیر مستقل است. در انتهای مدل‌سازی گروه هفتم قرار می‌گیرد که شامل تنها یک مدل است و هدف تعیین پارامتر مدل است. دلیل آوردن این معادله به صورت منفرد در یک گروه اختصاصی، شکل ویژه معادله آن است. در این معادله با الهام از جزء دوم معادله تأخیر HCM معادله‌ای در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۲) خلاصه نتایج آماری پرداخت مدل‌های گروه سوم و چهارم

مدل	مقدار پارامتر	آماره t	R^2
-----	---------------	-----------	-------

	a	b	c	a	b	c	
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^2 + bx)$	۱۵۹/۳۵	- ۹۲/۲۲	-	۷/۲۹	- ۲/۸۸	-	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^3 + bx^2 + cx)$	۵۴/۳۹	۲/۱۸	۲۴/۰/۶	۷/۲۷	۰/۳۵	۱/۴۸	۰/۷۶
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^3 + cx)$	۵۴/۳۹	-	۲۴/۰/۶	۷/۲۷	-	۱/۴۸	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + [d(x-1)^2 + b(x-1)]$	-۱۶۸	۵۲۹/۸۱	-	- ۲/۸	۱۴/۳۲	-	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + [d(x-1)^3 + b(x-1)^2 + c(x-1)]$	۱۸/۱۸	- ۱۸۴/۵	۵۳۳/۴۲	۰/۰/۳	- ۰/۳۲	۴/۱۸	۰/۷۶

جدول (۳) خلاصه نتایج آماری پرداخت مدل‌های گروه پنجم و ششم

مدل	مقدار پارامتر		آماره t		R^2
	a	b	a	b	
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^b$	۷۵/۶۳	۲/۶۳	۱۰/۸۸	۱۱/۴۳	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ae^{(bx)}$	۱۴/۸۳	۱/۷۹	۴/۲۶	۱۱/۳۵	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \log(x)$	۱۲۶۲/۶۰	-	۶۹/۸۴	-	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^b$	۳۹۰/۳۰	۰/۸۱۵	۱۷/۶۵	۱۱/۱۳	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ae^{[b(x-1)]}$	۸۹/۲۴	۱/۷۹	۱۲/۸۶	۱۱/۳۵	۰/۷۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \log(x-1)$	-۵۱۳/۸۹	-	- ۱۳/۵۱	-	منفی

جدول (۴) خلاصه نتیجه آماری پرداخت مدل گروه هفتم

مدل	مقدار پارامتر a	آماره t	R^2
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \times \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{C}} \right]$	۲۲۲٫۶۱	۶۶٫۱۱	۰٫۷۹

۳-۴. مدل‌های شاخص

پس از مقایسه مدلها از نظر نتایج آماری، مدل‌های جدول (۵)، مدل‌هایی بودند که در بین مدل‌های دیگر، مناسبتر تشخیص داده شدند؛ لذا ارزیابی بر روی آنها صورت می‌گیرد.

جدول (۵) مدل‌های شاخص

معادله پیشنهادی مدل	شماره مدل
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 65.4x^3$	۱
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 43.75x^4$	۲
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 447.25(x-1)$	۳
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + [529.8(x-1) - 168(x-1)^2]$	۴
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 1262.6 \log(x)$	۵
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 390.3(x-1)^{0.815}$	۶
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 222.7 \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{C}} \right]$	۷

۴-۴. ارزیابی مدل‌های شاخص

در این بخش مدل‌های مناسب در بین ۲۰ مدل معرفی شده، توسط اطلاعات یک پژوهش دیگر مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. این اطلاعات از مرجعی که به موضوع تأخیر در تقاطع‌های هم‌سطح چراغ‌دار در تهران می‌پردازد، انتخاب شدند [امینی، ۱۳۸۴]. جهت بررسی مدل‌های ارائه شده در جدول (۵)، مقدار تأخیر هر مدل با توجه به اطلاعات مرجع مورد اشاره محاسبه شده و در جدول (۶)، در کنار مقدار تأخیر مشاهده شده، آورده شده‌اند.

جدول (۶) مقایسه مقدار تأخیر مدل‌های شاخص

تأخیر مشاهده شده (ثانیه)	تأخیر مدل ۱ (ثانیه)	تأخیر مدل ۲ (ثانیه)	تأخیر مدل ۳ (ثانیه)	تأخیر مدل ۴ (ثانیه)	تأخیر مدل ۵ (ثانیه)	تأخیر مدل ۶ (ثانیه)	تأخیر مدل ۷ (ثانیه)
۱۹۲	۲۴۷	۲۳۴	۲۴۵	۲۵۲	۲۵۲	۲۵۲	۲۴۵
۱۲۸	۱۶۳	۱۴۰	۱۲۸	۱۳۷	۱۳۸	۱۴۴	۱۳۱
۲۱۲	۱۶۸	۱۴۵	۱۲۰	۱۲۶	۱۲۶	۱۳۴	۱۲۶
۱۳۶	۱۷۱	۱۴۹	۱۱۲	۱۱۴	۱۱۴	۱۲۰	۱۲۵

برای مقایسه دقیقتر این مدل‌ها، نسبت تأخیر مدل به تأخیر مشاهده شده، تعیین و به عنوان

پارامتر ζ در جدول (۷) گزارش شده است. در جدول (۸)، مقدار $\sum (\zeta - 1)^2$ برای هر مدل برآورد

شده که هرچه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده مناسبتر بودن مدل است. در این جدول مدل‌های ۲، ۳ و ۷ که معادلات آنها در قسمت‌های قبلی آورده شده، دارای مقبولیت بیشتری است که به عنوان مدل‌های پیشنهادی این تحقیق ارائه می‌گردد.

جدول (۷) نسبت تأخیر مدل (۵)

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶	مدل ۷
۱,۲۴	۱,۱۷	۱,۲۳	۱,۲۷	۱,۲۷	۱,۲۷	۱,۲۳
۱,۲۴	۱,۰۶	۰,۹۶	۱,۰۲	۱,۰۲	۱,۰۸	۰,۹۸
۱,۱۰	۱,۰۱	۱,۰۶	۱,۱۰	۱,۱۰	۱,۱۱	۱,۰۶
۱,۲۶	۱,۰۹	۰,۸۲	۰,۸۴	۰,۸۴	۰,۸۹	۰,۹۲

جدول (۸) مقایسه مدل‌های شاخص با توجه به مقدار $\sum(\zeta-1)^2$

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶	مدل ۷
۰,۱۹	۰,۰۴	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۰۶

۵. نتیجه‌گیری

پس از ارزیابی مدل‌های شاخص برآورد تأخیر در حالت فوق اشباع، در نهایت ۳ مدل پیشنهاد می‌شود که معادلات آنها در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۹) مدل‌های پیشنهادی

معادله مدل	مدل‌های پیشنهادی
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^4$	۲

$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x - 1)$	۳
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \times \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{4x}{C}} \right]$	۷

لازم به ذکر است مدلها و آیین‌نامه‌های برآورد تأخیر در کشورهای پیشرفته با مطالعه وسیعی در طی سالهای متمادی به دست آمده است. بنابراین، تنها با تعداد معدودی نمونه انتخابی که در این مقاله بر روی آنها مطالعه صورت گرفته است، نمی‌توان نتیجه‌گیری کاملی برای تقاطع‌های موجود در ایران به دست آورد و تنها این تحقیق گامی کوچک در تعیین مدل‌های مناسب برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغدار در حالت فوق‌اشباع برداشته است. لذا به منظور دستیابی به مناسبترین مدل از مدل‌های ارائه شده، پیشنهاد می‌گردد تقاطع‌های فوق‌اشباع بیشتری مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست منابع و مآخذ

۱. "آیین نامه ۱-۱۴۵ سازمان برنامه و بودجه، تقاطعهای هم سطح شهری- مبانی فنی"، فصل ۵، تحلیل عملکرد تقاطع، ۱۳۷۶.
۲. امینی شیرازی، حامد، منصور خاکی، علی، "مقایسه طراحی چراغهای راهنمایی به روش آیین نامه های آمریکا، استرالیا و انگلستان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۴.
۳. تابع زمان تأخیر در تقاطع های با چراغ راهنمایی، گزارش شماره ۷۵-۰۵، مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵.
۴. Akçelik, R., "Time-Dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals," Internal Report AIR ۳۳۷, Australian Road Research Board, Vermont South, Victoria, ۱۹۸۰.
۵. Akcelik, R., "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections," ITE Journal, March ۱۹۸۸.
۶. Akcelik, R. and Roupail, N. M., "Estimation of Delays at Traffic Signals for Variable Demand Conditions," Transportation Research B, Vol. ۲۷B, No. ۲, ۱۹۹۳.
۷. Fambro, D. B., and Roupail, N. M., "Generalized Delay Model for Signalized Intersections and Arterial Streets," Highway Capacity Issues and Analysis, Transportation Research Record ۱۵۷۲, Transportation Research Board, p. ۱۱۲-۱۲۱, Washington, D.C., ۱۹۹۷.

۸. Fu, L. and Hellings, B., "Delays Variability at a Signalized Intersections," Paper presented at the TRB, ۷۹th Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, ۲۰۰۰.
۹. Hurdle, V. F. ۱۹۸۴. Signalized intersection delay model—A primer for the uninitiated. In Traffic Capacity and Characteristics. (Transportation Research Record ۹۷۱). Washington, D.C.: Transportation Research Board. p. ۹۶-۱۰۵.
۱۰. ITE, "Canadian Capacity Guide for Signalized Intersection," Second Edition, S. Tepley Editor, Institute of Transportation Engineers, District ۷, Canada, ۱۹۹۵.
۱۱. Kang, Y., "Delay, Stop and Queue Estimation for Uniform and Random Traffic Arrivals at Fixed-Time Signalized Intersections," Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, ۲۰۰۰.
۱۲. Kamarajugadda A., and Byungkyu B., "Stochastic Traffic Signal Timing Optimization," Center for Transportation Studies, University of Virginia, UVACTS-۱۵-۰-۴۴, Charlottesville, USA, ۲۰۰۳.
۱۳. McShane, W. R. and Roess, R. P., "Traffic Engineering," Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc., New Jersey ۰۷۴۵۸, ۲۰۰۴.
۱۴. T Martin, P. and Perrin, J., "Real Time Measures of Effectiveness," Department of Civil and Environmental Engineering of University of Utah Traffic Lab, Salt Lake City, Utah, USA, ۲۰۰۳.
۱۵. Tepley, S. and Evans, G. D., "Evaluation of the Quality of Signal Progression by Delay Distributions," Transportation Research Record ۱۲۲۵, TRB, National Research Council, Washington, D. C., ۱۹۸۹.
۱۶. TRB, "Highway Capacity Manual ۲۰۰۰," Transportation Research Board, Chapter ۱۶, National Research Council, Washington, D.C., USA, ۲۰۰۰.
۱۷. Webster, F. V. ۱۹۵۸. Traffic Signal Settings. (Road Research Technical Paper No. ۳۹). London: Her Majesty's Stationery Office.
۱۸. Webster, F. V. & Cobbe, B. ۱۹۶۶. Traffic Signals. (Road Research Technical Paper No. ۵۶). London: Her Majesty's Stationery Office.