

مدل سازی تأخیر تقاطع های چراغدار در حالت فوق اشباع

مسعود نادر نژاد، کارشناس ارشد راه و ترابری از دانشگاه صنعتی شریف،

کارشناس سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری مشهد

masoud_n1979@yahoo.com

حبیب الله نصیری، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف،

nassiri@sharif.edu

چکیده :

محاسبه زمان تأخیر و شناخت آن در تقاطع های چراغدار که خود از مهمترین ارکان سیستم حمل و نقل شهری محسوب می شود، از آنجا که بر میزان اتلاف وقت افراد، هزینه مصرف سوخت، آلودگی هوا و در کل بر هزینه استفاده از شبکه موثر می باشد، در مطالعات ترافیک از جایگاه خاصی برخوردار است. در این تحقیق به محاسبه زمان تأخیر در تقاطع های چراغدار در حالت فوق اشباع پرداخته می شود. این بررسی بر مبنای اطلاعات جمع آوری 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 شد که با بررسی چند مدل پیشنهادی برآورد تأخیر و مقایسه آن با شرایط میدانی، مدل مناسبی برای برآورد تأخیر تقاطع های چراغدار در حالت فوق اشباع ارائه گردد. نتایج نشان می دهد که از بین ۲۰ مدل بررسی شده، تنها سه مدل برازش معنی داری به آمار جمع آوری شده داشتند.

کلید واژه : مدل سازی^۱، تأخیر^۲، تقاطع چراغدار^۳، فوق اشباع^۴

۱- مقدمه

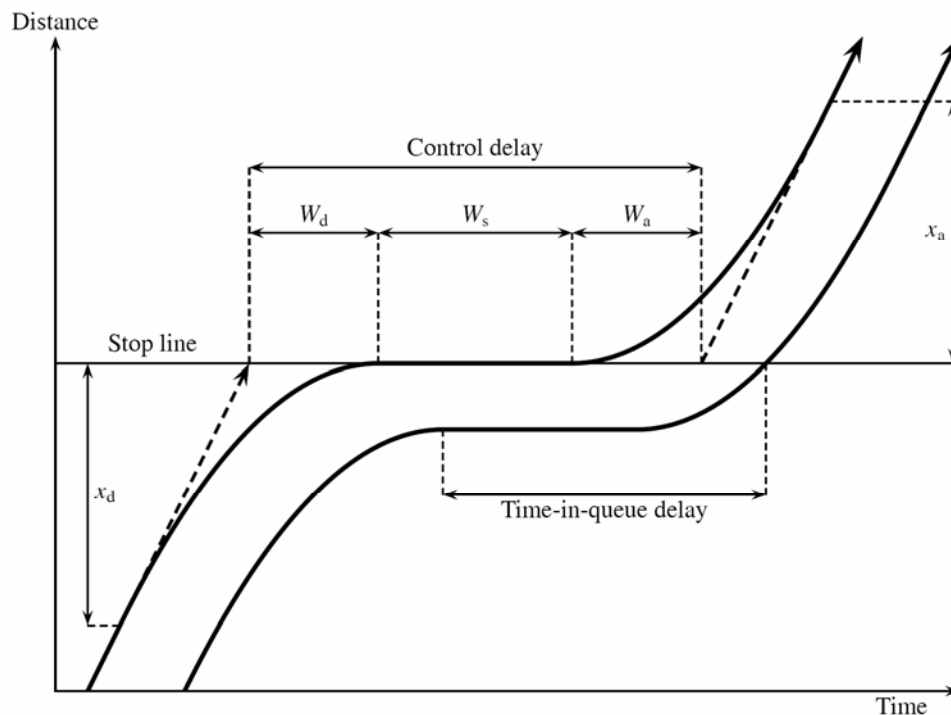
امروزه با افزایش جمعیت و همچنین بالا رفتن سرانه مالکیت اتومبیل، معضلی به نام ترافیک، در بیشتر شهرهای بزرگ دیده می شود. یکی از عوامل افزایش زمان سفر خیابان های شهری، وجود تقاطع های چراغدار است. تقاطع های چراغدار نقاط کنترل کننده جریان ترافیک در سطح شبکه هستند که مقدار تأخیر در آنها معیار اندازه گیری مناسبی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

-
- 1 Modeling
 - 2 Delay
 - 3 Signalized Intersection
 - 4 Over-Saturated

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]. هنگامیکه 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 مسأله

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 می‌باشد [TRB,2000].



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 فوق اشباع همواره مشکل بوده است [Fu,2000]. روش‌های متعددی برای ارزیابی و محاسبه زمان تأخیر در تقاطع‌های فوق اشباع بوجود 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 فوق اشباع که بیشتر به رفتار رانندگان و شرایط کشور ما شبیه است؛ مسأله‌ای است که هدف این تحقیق می‌باشد.

1 Interrupted Flow

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, 1958 و Webster, 1966].

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

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 بدست آمد و حدود ۵ تا ۱۵ درصد کل زمان تأخیر محاسبه شده است، معادله خود را تصحیح کرد.

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

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 فوق‌اشباع 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. همانطور که ذکر شد چون معادله (۱) تا اندازه‌ای تأخیر تصادفی را 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,1984 و Akcelik,1988 و Teply,1989 و Akcelik,1993]. این مدل‌ها شامل فرضیات زیر هستند [Kang,2000]:

- وسایل نقلیه قادرند بطور 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 فوق‌اشباع میانگین به صورت معادله (۴) تخمین زده می‌شود [McShane,2004].

$$w = w_u + w_o = \frac{1}{2}[(c - g) + t(\rho - 1)] \quad (۴)$$

۳-۳- مدل آئین نامه ظرفیت کانادا ۱۹۹۵

در این آئین نامه که نتیجه فعالیت‌های تپلی بود، تأخیر میانگین^۶ وسایل نقلیه، به وسیله معادله (۵) محاسبه می‌شود. [ITE,1995]

$$d = d_1 \times k_f + d_2 \quad (۵)$$

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^۷ که بیشتر در تقاطع‌های هماهنگ^۸ نمود پیدا می‌کند و d_2 تأخیر اتفاقی و اضافی^۹ است.

-
- 1 Hurdle
 - 2 Teply
 - 3 Akcelik
 - 4 Poisson Distribution
 - 5 First In First Out
 - 6 Average Delay per Vehicle for a Lane Group
 - 7 Adjustment factor for the effect of the quality of progression
 - 8 Coordinated Signals
 - 9 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 آئین نامه استرالیا^۳

در این آئین‌نامه که نتیجه فعالیت‌های اکلیک و دیگران بود، تأخیر میانگین وسایل نقلیه در حالت فوق اشباع، به وسیله معادله (۹) محاسبه می‌شود. [Akçelik, 1980]

$$d = d_u + d_o = c \frac{\left(1 - \frac{g_e}{c}\right)}{2} + \frac{T}{4} \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \left(\frac{12(X-X_o)}{CT}\right)} \right] \quad (9)$$

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

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.

-
- 1 Arrival flow during the green interval
 - 2 Supplemental adjustment factor
 - 3 Australian Road Capacity Guide

۳-۵- آئین نامه ظرفیت بزرگراه‌های آمریکا ۲۰۰۰

بعد از انتشار این آئین‌نامه 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 پریودروس و کوگا^۴ در سال ۱۹۹۶ مدل‌های محاسبه تأخیر این آئین 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, 2000].

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, 1997]. در این آئین‌نامه تأخیر میانگین وسایل نقلیه، به‌وسیله معادلات (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود [TRB, 2000].

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

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

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

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

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^۷ 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^۸ است که برای تقاطع منفرد عدد ۱/۰ فرض می‌شود.

-
- 1 Daniel et al. (1996)
 - 2 Non-Random Arrivals
 - 3 Braun and Ivan (1996)
 - 4 Prevedouros and Koga (1996)
 - 5 Progression Factor (PF)
 - 6 Fambro and Rouphail (1997)
 - 7 Pre-timed Signals
 - 8 Upstream Filtering/Metering Adjustment Factor

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^۱ است که در آنالیز تقاطع‌های هماهنگ استفاده می‌شود. ضریب تعدیل پیشروی، اثر چراغ‌های راهنمایی هماهنگ با هم و کنترل 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 فازبندی 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^۲

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 ۲۵۰ 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:

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 زمان ثابت و با درجه اشباع بزرگتر از واحد انتخاب شدند، زیرا هدف از این تحقیق آرایه مدل برآورد تأخیر در تقاطع‌های چراغدار در حالت فوق اشباع بود.

1 Progression adjustment Factor

مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف

Institute for Transport Studies and Research at Sharif University of Technology

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.

هنگامیکه نسبت حجم به ظرفیت (X) کوچکتر از ۱ باشد، حجم‌های ورودی (تقاضا) با حجم‌های خروجی (عرضه) کمتر یا مساوی ۱ هستند. هنگامیکه 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.

۴- مدل‌سازی:

۴-۱- معرفی متغیرها در ساخت مدل

متغیرهای مستقل بکار رفته در ساخت مدل‌ها عبارت‌اند از طول دوره تناوب چراغ راهنمایی بر حسب ثانیه (C) و طول دوره سبز موثر بر حسب ثانیه برای رویکرد مورد نظر (ge)، 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 بکار 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 می‌شود [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) می‌باشد، در مدل‌سازی به عنوان متغیرهای مستقل تلقی می‌شوند.

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

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

¹ The Floating Car Method

² Average Stopped Delay

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 شده‌اند، اما چون چراغ راهنمایی به صورت از پیش زمان‌بندی شده کار می‌کند، لذا کارکرد آنها به صورت متغیرهای مستقل است. متغیر وابسته‌ای ۱ که در ساخت مدل‌ها می‌توان به کار برد، زمان تأخیر مشاهده شده (d_{Observed}) است. مطابق معادله (۳) زمان تأخیر را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد؛ که قسمت اول (d_1) مربوط به تأخیر یکنواخت و قسمت دوم (d_2) در ارتباط با تأخیر فوق اشباع است. از آنجا که تأخیر یکنواخت در مدل‌ها (d_1)، 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 ارایه 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
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax$	141/15	45/47	منفی
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^2$	96/65	64/13	0/51
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^3$	65/39	68/74	0/79
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^4$	43/75	51/57	0/77
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)$	447/26	64/55	0/78
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^2$	876/04	26/60	0/59
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^3$	1609/37	16/52	0/23
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^4$	2748/75	11/65	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. همانطور که در این جدول مشخص است، تفاوت این دو گروه در استفاده از (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	
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^2 + bx)$	159/35	-92/22	-	7/29	-2/88	-	0/75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^3 + bx^2 + cx)$	54/39	2/18	24/06	7/27	0/35	1/48	0/76
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + (ax^3 + cx)$	54/39	-	24/06	7/27	-	1/48	0/75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + [a(x-1)^2 + b(x-1)]$	-168	529/81	-	-2/8	14/32	-	0/75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + [a(x-1)^3 + b(x-1)^2 + c(x-1)]$	18/18	-184/5	533/42	0/03	-0/32	4/18	0/76

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

مدل	مقدار پارامتر		آماره t		R2
	a	b	a	b	
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ax^b$	75/63	2,63	10,88	11,43	0,75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ae^{(bx)}$	14,83	1,79	4,26	11,35	0,75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \log(x)$	1262,60	-	69,84	-	0,75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a(x-1)^b$	390,30	0,815	17,65	11,13	0,75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + ae^{[b(x-1)]}$	89,24	1,79	12,86	11,35	0,75
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \log(x-1)$	-513,89	-	-13,51	-	منفی

جدول (۴) خلاصه نتیجه آماری پرداخت مدل گروه هفتم

مدل	مقدار پارامتر a	آماره t	R2
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + a \times \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{C}} \right]$	222,68	66,11	0,79

۴-۳- 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]. به منظور 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

به منظور 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 (ξ)

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 $\sum(\xi - 1)^2$

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 شده‌اند.

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 فوق اشباع برداشته است. لذا به منظور دستیابی به مناسب‌ترین مدل از مدل‌های ارائه شده، پیشنهاد می‌گردد تقاطع‌های فوق اشباع بیشتری مورد بررسی قرار گیرد.

۶- مراجع:

- ۱- " آئین نامه ۱-۱۴۵ سازمان برنامه و بودجه، تقاطع‌های هم‌سطح شهری- مبانی فنی"، فصل ۵، تحلیل عملکرد تقاطع، ۱۳۷۶.
- ۲- امینی شیرازی، حامد، منصور خاکی، علی، "مقایسه طراحی چراغهای راهنمایی به روش آیین‌نامه‌های آمریکا، استرالیا و انگلستان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۴.
- ۳- تابع زمان تأخیر در تقاطع‌های با چراغ راهنمایی، گزارش شماره ۷۵-۰۵، مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵.
- 4- Akçelik, R., "Time-Dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals," Internal Report AIR 367, Australian Road Research Board, Vermont South, Victoria, 1980.
- 5- Akcelik, R., "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections," ITE Journal, March 1988.
- 6- Akcelik, R. and Roupail, N. M., "Estimation of Delays at Traffic Signals for Variable Demand Conditions," Transportation Research B, Vol. 27B, No. 2, 1993.
- 7- Fambro, D. B., and Roupail, N. M., "Generalized Delay Model for Signalized Intersections and Arterial Streets," Highway Capacity Issues and Analysis, Transportation Research Record 1572, Transportation Research Board, p. 112-121, Washington, D.C., 1997.
- 8- Fu, L. and Hellings, B., "Delays Variability at a Signalized Intersections," Paper presented at the TRB, 79th Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, ۲۰۰۰.
- 9- Hurdle, V. F. 1984. Signalized intersection delay model—A primer for the uninitiated. In Traffic Capacity and Characteristics. (Transportation Research Record 971). Washington, D.C.: Transportation Research Board. p. 96-105.
- 10- ITE, "Canadian Capacity Guide for Signalized Intersection," Second Edition, S. Tepley Editor, Institute of Transportation Engineers, District 7, Canada, 1995.
- 11- 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, 2000.
- 12- Kamarajugadda A., and Byungkyu B., "Stochastic Traffic Signal Timing Optimization," Center for Transportation Studies, University of Virginia, UVACTS-15-0-44, Charlottesville, USA, 2003.
- 13- McShane, W. R. and Roess, R. P., "Traffic Engineering," Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc., New Jersey 07۴۰۸, ۲۰۰۴.

14- 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, 2003.

15- Teply, S. and Evans, G. D., “Evaluation of the Quality of Signal Progression by Delay Distributions,” Transportation Research Record 1225, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1989.

16- TRB, “*Highway Capacity Manual 2000*,” Transportation Research Board, Chapter 16, National Research Council, Washington, D.C., USA, 2000.

17- Webster, F. V. 1958. Traffic Signal Settings. (Road Research Technical Paper No. 39). London: Her Majesty’s Stationery Office.

18- Webster, F. V. & Cobbe, B. 1966. Traffic Signals. (Road Research Technical Paper No. 56). London: Her Majesty’s Stationery Office.