



مدل سازی تأخیر تقاطع‌های چراغدار در حالت فوق اشباع

حبیب‌الله نصیری، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران*

مسعود نادرزاد، کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران**

* تلفن: ۶۶۱۶۴۲۴۸، شماره: ۶۶۰۱۴۸۲۸، پست الکترونیکی: nassiri@sharif.edu

** تلفن: 09125068722، پست الکترونیکی: masoud_n1979@yahoo.com

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 می‌باشد، 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 شد 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 برآزش معنی‌داری به آمار جمع‌آوری شده داشتند.

کلیدواژه: مدل‌سازی، تأخیر^۱، تقاطع چراغدار^۲، فوق اشباع^۳

۱- مقدمه:

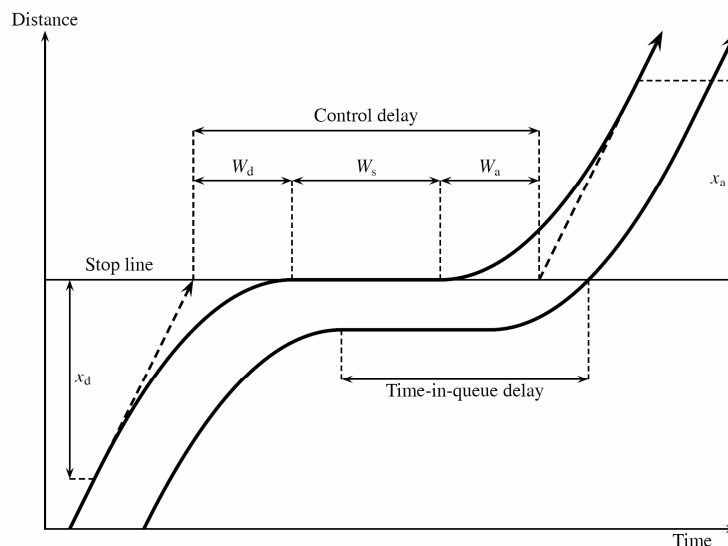
امروزه با افزایش جمعیت و همچنین بالا رفتن سرانه مالکیت اتومبیل، معضلی به نام ترافیک، در بیشتر شهرهای بزرگ دیده می‌شود. یکی از عوامل افزایش زمان سفر خیابان‌های شهری، وجود تقاطع‌های چراغدار است. تقاطع‌های چراغدار نقاط کنترل‌کننده جریان ترافیک در سطح شبکه هستند که مقدار تأخیر در آنها معیار اندازه‌گیری مناسبی است که برای بیان خصوصیات عملکردی تقاطع چراغدار بکار می‌رود [۱].

1 Delay
2 Signalized Intersection
3 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 [۲]. 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 زمانیکه تقاضای وسایل نقلیه برای عبور، در رویکردهای تقاطع کاهش پیدا نکند، ادامه می‌یابد. در این حالت تقاطع را فوق اشباع می‌گویند [۳].

۲- تعریف مسأله :

تأخیر در تقاطع‌های چراغدار، مطابق شکل (۱)، اختلاف زمان سفر بین دو حالتی است که وسیله نقلیه بدون تأثیرپذیری 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^۳ و افزایش سرعت^۴ می‌باشد [۴].



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 [5]. 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، ارائه نمی‌دهند [6]. 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.

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. این اطلاعات شامل شرایط هندسی، اطلاعاتی در مورد نحوه عملکرد چراغ راهنمایی و شرایط ترافیکی است [4]؛ 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 و 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 [4]. 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 (g_e)، کل حجم جریان ترافیک در خیابان ورودی بر حسب وسیله نقلیه سواری در ساعت (I) که به صورت همسنگ معادل سواری محاسبه شده است.

1 The Floating Car Method
2 Average Stopped Delay

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 [۷]؛ و نزدیک به عدد ۴۲۸ است که برای شرایط ایران پیشنهاد شده است [۸]. 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.

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

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

لازم به ذکر است هرچند 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.

$$d = d_1 + d_2 \quad (3)$$

$$d_1 = \frac{(c - g_e)}{2} \quad (4)$$

$$d_2 = d_{Observed} - d_1 \quad (5)$$

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 چند جمله‌ای‌های بر حسب (x) هدف است و در گروه چهارم که شبیه گروه سوم است، هدف تعیین

¹ Dependent Variable

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) 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	
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c-g_e)}{2} + (ax^2 + bx)$	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	-	-	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	-184/52	533/42	0/03	-0/327	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

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
$d = d_1 + d_2 = \frac{(c - g_e)}{2} + 65.4x^3$	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 [6]. به منظور بررسی مدل‌های ارایه 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)
192	247	234	245	252	252	252	245
128	163	140	128	137	138	144	131
۲۱۲	168	145	120	126	126	134	126
136	171	149	112	114	114	120	125

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 ارایه می‌گردد.

جدول (۷) نسبت تأخیر مدل (ζ)

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶	مدل ۷
1.24	1.17	1.23	1.27	1.27	1.27	1.23
1.24	1.06	0.96	1.02	1.02	1.08	0.98
1.10	1.01	1.06	1.10	1.10	1.11	1.06
1.26	1.09	0.82	0.84	0.84	0.89	0.92

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
0.19	0.04	0.09	0.11	0.11	0.11	0.06

۵- نتیجه‌گیری:

پس از ارزیابی مدل‌های شاخص برآورد تأخیر در حالت فوق‌اشباع، در نهایت ۳ مدل پیشنهاد می‌شود که معادلات آنها در جدول (۹) ارایه 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.

6- مراجع:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Kamarajugadda A., and Byungkyu B., "Stochastic Traffic Signal Timing Optimization," Center for Transportation Studies, University of Virginia, UVACTS-15-0-44, Charlottesville, USA, 2003.
- [4] TRB, "Highway Capacity Manual 2000," Transportation Research Board, Chapter 16, National Research Council, Washington, D.C., USA, 2000.
- [5] Fu, L. and Hellinga, 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.

[6] 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.

[7] "تابع زمان تأخیر در تقاطع‌های با چراغ راهنمایی"، گزارش شماره ۰۵-۷۵، مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵.

[8] "آیین نامه ۱-۱۴۵ سازمان برنامه و بودجه، تقاطع‌های هم‌سطح شهری- مبانی فنی"، فصل ۵، تحلیل عملکرد تقاطع، 1376.