

## ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌ها برای رژیم اشباع و فوق اشباع در تقاطع -

### های چراغ‌دار

عمادالدین خرازیان، کارشناس ارشد راه‌وترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

ایمان آقایان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

عبدالاحد چوپانی (مسئول مکاتبات) استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

عباس محمدی، مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

E-mail: ahadchoupani@shahroodut.ac.ir :

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳

#### چکیده

از آنجا که ظرفیت راه‌ها معمولاً بر حسب خودروی سواری بیان می‌شود، بایستی جریان ترافیکی مختلط شامل انواع وسیله نقلیه به جریان همگن (بر حسب خودروی سواری) تبدیل گردد و این کار با استفاده از ضریب همسنگ سواری امکان‌پذیر هست. مروری بر مطالعات پیشین، نشان داد ضریب همسنگ برای تقاطعات چراغ‌دار به تفکیک رژیم جریان تعیین نشده؛ از شاخص تاخیر که شاخص عملکرد و سطح سرویس تقاطعات چراغ‌دار است استفاده نشده؛ ضریب همسنگ عدد ثابتی در نظر گرفته شده و تاثیر عوامل موثر بر ضریب همسنگ بررسی نشده است. هدف این پژوهش، تعیین ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌های عبوری از تقاطعات درون شهری در سه رژیم زیر اشباع، فوق اشباع، و اشباع (یا نزدیک به اشباع) با استفاده از شاخص تاخیر و بررسی عوامل موثر بر ضریب همسنگ سواری است. برای مطالعه موردی، پنج تقاطع در شهر مشهد انتخاب و برای محاسبه تاخیر از روش آیین‌نامه ظرفیت راه‌ها (HCM2016) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد در رژیم اشباع، به دلیل ناپایداری جریان، ضریب همسنگ بیشترین مقدار را داراست و در رژیم زیر اشباع به دلیل آزادی عمل خودروهای سواری و خودداری آنها از قرارگیری در پشت اتوبوس، ضریب همسنگ اتوبوس کمی بیشتر از ۱ و در حد یک خودروی سواری است. مقدار ضریب همسنگ به ازای سناریوهای مختلف حجم تردد، درصد خودروهای سنگین، و نسبت سبز محاسبه گردید و سه مدل خطی برای هر کدام از رژیم‌های جریان ارائه گردید. ضریب همسنگی این مدل‌ها بسیار خوب و بالاتر از ۱۰/۸۵ است. به ترتیب عوامل حجم تردد و نسبت سبز تاثیرگذارترین متغیرها بر ضریب همسنگ هستند.

واژه های کلیدی: تقاطعات چراغ‌دار، رژیم جریان، اشباع و فوق اشباع، تاخیر کنترل، ضریب همسنگ، اتوبوس درون شهری.

## ۱. مقدمه

وسایل نقلیه سنگین به علت ابعاد بزرگتر، و همچنین ویژگی‌های عملکردی ضعیف‌تر همچون قدرت شتاب‌گیری و مانور کمتر، در مقایسه با خودروهای سواری، سبب ایجاد اثرات منفی بیشتری روی جریان ترافیک می‌گردند. از این رو جهت اعمال اثرات منفی و سایل نقلیه سنگین روی جریان ترافیک از ضریب همسنگ سواری<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این ضریب بیانگر این است که یک وسیله نقلیه سنگین با چه تعداد وسیله نقلیه سواری می‌تواند جایگزین شود تا همان اثرات منفی وسیله نقلیه سنگین روی جریان ترافیک اعمال شود [TRB, 2016].

آیین نامه ظرفیت راه‌ها [TRB, 2016]، ضریب همسنگ خودروهای سنگین در مقاطع پایه آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها را به صورت متغیری که تابع شیب مسیر، درصد وسایل نقلیه سنگین عبوری، و نیز حجم عبوری از تقاطع است، پیشنهاد می‌کند؛ در حالی که ضریب همسنگ سواری در تقاطعات چراغ‌دار را همواره برابر عدد ثابت دو که وابستگی به پارامترهای ترافیکی تقاطعات ندارد، پیشنهاد می‌کند.

در اکثر روش‌های تعیین ضریب همسنگ سواری، یک شاخص ترافیکی به عنوان شاخص مرجع در نظر گرفته می‌شود و با محاسبه اختلاف این شاخص مرجع در دو حالت حضور و سبیله نقلیه سنگین و عدم حضور آن، مقدار ضریب همسنگ وسیله نقلیه سنگین پیشنهاد می‌گردد. به عنوان مثال گرین شیلدز و همکاران [Greenshields, Shapiro and Erickson, 1946] سرفاصله زمانی، و آیین‌نامه ظرفیت راه‌های ایالات متحده [TRB, 2016]، نرخ جریان اشباع را به‌کاربردند. وبستر [Webster, 1958] متوسط تعداد وسایل نقلیه خروجی از تقاطع و [Molina, 1987; Benekohal and Zhao, 2000] تاخیر را به عنوان پارامتر مبنا انتخاب کردند. موهان و چاندر را بر اساس نرخ تخلیه صف (QCR)<sup>۲</sup>، ضریب همسنگ سواری را برای تقاطعات بدون چراغ [Mohan and Chandra, 2016] و چراغ‌دار [Mohan

and Chandra, 2017] برآورد کردند. روش [Geistefeldt, 2009] بر پایه مفهوم ظرفیت تصادفی است. وی، توابع توزیع تجمعی<sup>۳</sup> ظرفیت را بر اساس خودروی سواری تخمین می‌زند. سپس، با تعیین یک ضریب برابری که ضریب تغییرات<sup>۴</sup> تابع توزیع ظرفیت را کمینه می‌کند، ضریب همسنگ را برآورد می‌کند. شالینی و کومار، با مروری بر روش‌های تعیین ضریب همسنگ، به این نتیجه رسیدند که سرفاصله، رایج‌ترین شاخص برای تعیین ضریب همسنگ است [Shalini and Kumar, 2014].

علاوه بر استفاده از شاخص‌های متعدد برای تعیین ضریب همسنگ سواری، محققین سعی کردند مقادیر ضریب همسنگ را برای تسهیلات مختلف جاده‌ای استخراج کنند. لی [Lee, 2015] و [Giuffrè, Gran`a and Tumminello, 2017] ضریب همسنگ سواری را برای میدان‌ها و [Ahmed and Cetin, 2017] برای تونل‌ها تعیین کردند. احمد و همکاران [Ahmed, Drakopoulos and Ng, 2013]، تاثیر مکان گلوگاه‌های<sup>۵</sup> ترافیکی را بر تغییرات ضریب همسنگ سواری به ازای درصد خودروهای سنگین بررسی کردند.

امینی و شهزاد [Amini and Shahrard, 2013] ضریب همسنگ سواری و سایل نقلیه سنگین را برای راه‌های دوخطه (ایران) بر اساس دو روش اختلاف سرعت و سرفاصله استخراج کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد ضرایب به دست آمده از دو روش تا حد زیادی با هم همخوانی دارند و ضرایب به‌دست آمده، از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه ظرفیت راه‌ها کمتر است. خاکی و ناصری فرد [Khaki and Naserifard, 2011] ضریب همسنگ موتور سیکت را بر اساس داده‌های میدانی و شکیبایی و بهزادی [Shakibaei and Behzadi, 2016] ضریب همسنگ ون را به کمک داده‌های شبیه ساز AIMSUN برآورد کردند. نصیری و همکاران [Nassiri, Tabatabaei, and Sahebi, 2017] ضریب همسنگ را برای تقاطعات چراغ‌دار زیر اشباع به دست آوردند. افشاری و

با توجه به نتایج حاصل از مرور بر ادبیات، هدف پژوهش جاری برآورد ضریب همسنگ اتوبوس برای تقاطعات چراغ‌دار به تفکیک رژیم جریان، یعنی زیر اشباع، نزدیک به اشباع، و فوق اشباع است. برای این منظور شاخص تاخیر، شاخص عملکرد و سطح سرویس تقاطع چراغ‌دار، به کار می‌رود که نسبت به سایر شاخص‌ها (نظیر سرفاصله زمانی)، توجه بهتری دارد. برای محاسبه تاثیر اتوبوس بر تاخیر جریان ترافیک، علاوه بر تاخیر یکنواخت، تاثیر تاخیر تصادفی نیز در نظر گرفته می‌شود. سپس عوامل موثر بر ضریب همسنگ شناسایی می‌شود. در نهایت مدل‌هایی برای تعیین ضریب همسنگ سواری اتوبوس و تبیین عوامل موثر بر آن ساخته و پرداخته می‌شود. در مطالعه جاری، بر تعیین ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌های خطوط معمولی تمرکز می‌شود.

## ۲. مروری بر ادبیات تحقیق

از سال ۱۹۴۶ روش‌های متفاوتی جهت تعیین ضریب همسنگ سواری ارائه شده است. در ادامه این بحث به برخی روش‌های تعیین ضریب همسنگ در تقاطعات چراغ‌دار اشاره می‌شود. روش نسبت سرفاصله<sup>۶</sup> رایج‌ترین روش تعیین ضریب همسنگ است و گرین شیلدز از پیشگامان این روش به حساب می‌آید [Greenshields, Shapiro and Erickson, 1946]. معادله ۱ برای تعیین PCE با استفاده از این مدل ارائه شد.

$$PCE = \frac{h_t}{h_c} \quad (1)$$

که در آن PCE ضریب همسنگ سواری،  $h_t$  متوسط سرفاصله زمانی<sup>۸</sup> وسیله نوع  $t$  در جریان و  $h_c$  متوسط سرفاصله زمانی وسایل سواری در صف (بر حسب ثانیه) است. مولینا [Molina, 1987] مدلی مطابق با معادله ۲ بر مبنای روش سرفاصله زمانی ارائه داد:

$$PCE = 1 + \frac{TT_t - TT_c}{h_c} \quad (2)$$

که در آن،  $TT_t$  و  $TT_c$  به ترتیب زمان تخلیه صف (بر حسب ثانیه) در جریان مختلط و پایه است.

آیتی [Afshari and Aiati, in press] تأثیرات طرح هندسی و وضعیت ترافیک بر تخلفات عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار شهری را ارزیابی کردند.

مرور بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد:

۱. ضریب همسنگ سواری تسهیلات مختلف نظیر مقاطع پایه آزادراهی و بزرگراهی، تقاطعات چراغ‌دار، پل، و تونل با هم متفاوت است و ضریب همسنگ برای هر کدام به صورت جداگانه برآورد می‌شود. به دلیل حجم بالای تردد در تقاطعات چراغ‌دار شهری، تعیین ضریب همسنگ برای تقاطعات چراغ‌دار، همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است.

۲. با توجه به مرور بر ادبیاتی که نویسندگان انجام دادند، ضریب همسنگ تاکنون به تفکیک رژیم جریان برآورد نشده است.

۳. چون شاخص عملکرد و سطح سرویس تقاطعات چراغ‌دار، تاخیر است، تعیین ضریب همسنگ بر مبنای شاخص تاخیر مناسب‌تر است. روش تاخیر به جای ارائه تنها یک برآورد نقطه‌ای از ضریب همسنگ، یک ضریب همسنگ مجزا برای هر خودروی غیر سواری ارائه می‌کند و تابع توزیع احتمال ضریب همسنگ نیز به دست می‌آید.

۴. ضریب همسنگ برای تقاطعات چراغ‌دار مقدار ثابتی دارد [TRB, 2016].

۵. در تقاطعات چراغ‌دار تاخیر هر وسیله نقلیه حاصل جمع دو شاخص تاخیر یکنواخت و تاخیر تصادفی است. تاخیر تصادفی جهت محاسبه تاخیر ناشی از ورود اتفاقی و غیریکنواخت و سایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات گذشته [Nassiri, Tabatabaei, and Sahebi, 2017; Benehkoal and Zhao, 2000] فرض ورود اتفاقی و سایل نقلیه به تقاطع جهت محاسبه تاخیر اضافی<sup>۹</sup>، در نظر گرفته نشده است و تنها به محاسبه تاخیر یکنواخت بسنده شده است.

روش بهینه‌سازی که توسط [Radhakrishnan and Mathew, 2011] پیشنهاد گردید به‌وسیله کمینه کردن تغییرات بین نرخ جریان اشباع پایه و نرخ جریان تقاطع، مقدار عددی ضریب همسنگ سواری را به‌دست می‌دهد. این کمینه‌سازی بر اساس معادله شماره ۷ است که در آن (veh/h)  $S_b$  نرخ جریان اشباع پایه،  $S_i$  (veh/h) نرخ جریان اشباع مختلط (شامل همه نوع وسیله نقلیه سبک و سنگین)،  $n_j$  تعداد وسایل نقلیه گروه  $j$ ،  $p_j$  ضریب همسنگ سواری و وسایل نقلیه گروه  $j$  و  $N$  تعداد چرخه‌های برداشت داده است.

$$z_{min} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_b - S_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_b^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2}} \quad (7)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^K n_j p_j, \quad p_j > p_{j,min}$$

روش نرخ تخلیه صف (QCR) توسط موهان و چاندرا [Mohan and Chandra, 2016] و سپس برای تقاطعات چراغ‌دار [Mohan and Chandra, 2017] به کار رفت. اساس این روش مبتنی بر مدت زمانی است که یک صف ایجاد شده از خودروها در یک تقاطع نیاز دارند تا بتوانند به‌طور کامل تقاطع را تخلیه نمایند. این روش جهت ارزیابی کیفیت و سرعت تخلیه صف، پارامتری به نام نرخ تخلیه صف را تعریف می‌کند. بر اساس معادله ۸، QCR نرخ تخلیه صف بوده و به صورت نسبت تعداد خودروهای تخلیه شده ( $N_c$ ) از ناحیه تداخلی تقاطع در مدت زمان  $T(s)$  تعریف می‌شود. همچنین  $N_c$  را می‌توان به صورت معادله ۹ بازنویسی کرد.

$$QCR = \frac{N_c}{T} \quad (8)$$

$$N_c = \sum_{j=1}^k n_j \frac{W_{car}}{W_j} PCE_j \quad (9)$$

در روابط فوق  $T$  را می‌توان با اختلاف زمانی بین ورود سپر جلوی اولین وسیله در صف تا لحظه خروج سپر عقبی آخرین وسیله نقلیه در صف از خط توقف محاسبه نمود.  $W_{car}$  (m) عرض استاندارد خودروی سواری،  $W_j$  (m) عرض خودروی

وبستر [Webster, 1958] وسایل نقلیه را به دوگروه سواری و باری تقسیم‌بندی نمود و با جمع آوری داده‌ها در  $N$  چرخه متوالی چراغ راهنمایی، متوسط وسایل باری خروجی ( $\bar{n}_g$ ) را برحسب متوسط وسایل سواری ( $\bar{n}_l$ ) از تقاطع در هر چرخه (به کمک روابط ذیل) ترسیم نمود:

$$\bar{n}_g = \frac{\sum n_g}{N} \quad (3)$$

$$\bar{n}_l = \frac{\sum n_l}{N} \quad (4)$$

در روابط فوق،  $\sum n_g$  و  $\sum n_l$  به ترتیب عبارت است از تعداد وسایل نقلیه سبک و سنگین در چرخه‌های چراغ راهنمایی. وبستر با برازش خطی از میان این دو پارامتر ( $\bar{n}_l$  و  $\bar{n}_g$ )، معکوس شیب خط مذکور را به عنوان ضریب همسنگ سواری معرفی نمود.

برانستون و گپی [Branston and Gipps, 1981] برای محاسبه ضریب همسنگ از رگرسیون خطی چندگانه استفاده کردند. تعداد و نوع وسایل خروجی در یک بازه زمانی  $T$  که در لحظه دلخواهی در زمان سبز شروع و در لحظه دلخواهی در این زمان پایان می‌یافت، ثبت شدند. براساس اینکه پایان  $T$  با خروج یک وسیله نقلیه مشخص می‌شود یا زمانی بین خروج دو وسیله پشت سرهم باشد، این روش به دو دسته همزمان و غیرهمزمان تقسیم‌بندی شد. سپس بر اساس معادله ۵ تعداد وسایل نقلیه سواری به صورت تابعی از تعداد وسایل نقلیه سنگین، برازش داده شد و نهایتاً ضرایب  $Q_b$  و  $PCE_j$  برآورد شد.

$$n_{car} = Q_b T - \sum n_j \cdot PCE_j + \varepsilon \quad (5)$$

که در آن،  $Q_b$  (pc/h) نرخ جریان اشباع سواری و  $PCE_j$  ضریب همسنگ وسیله نقلیه نوع  $j$ ،  $n_j$  تعداد وسایل نقلیه نوع  $j$ ،  $n_{car}$  تعداد سواری عبوری در مدت زمان  $T$  و  $\varepsilon$  خطای مدل است. بن کوهال و ژائو [Benehkoal and Zhao, 2000]

و ژائو [Zhao, 1996] روش مبتنی بر تاخیر را برای تعیین ضریب همسنگ ارائه کردند که به شکل ذیل است:

$$PCE = 1 + \frac{\Delta d}{d_0} \quad (6)$$

در این مدل، متوسط تاخیر ایجاد شده در اثر حضور وسایل نقلیه سنگین در جریان مختلط ( $\Delta d$ ) و همچنین تاخیر متوسط به ازای هر وسیله نقلیه در جریان پایه ( $d_0$ ) بر حسب ثانیه از پارامترهای اصلی این مدل محسوب می‌گردد.

دوربین‌های نصب شده در هر تقاطع با دارا بودن ارتفاعی مناسب از خودروها، سبب می‌شود تا سرفاصله زمانی و سایل نقلیه با دقت قابل قبول برداشت گردد. علاوه بر سرفاصله زمانی، اطلاعات دیگری نظیر حجم عبوری و سایل نقلیه از تقاطع نیز برداشت گردید (جدول ۱). حجم تردد و سایل نقلیه از  $229 \text{ veh/h/lane}$  تا  $376 \text{ veh/h/lane}$  متغیر است. همچنین درصد اتوبوس عبوری از تقاطع از ۰/۷ درصد تا ۲/۸ درصد متغیر است. لازم به ذکر است مسیر حرکت اتوبوس‌ها مستقیم بوده و به ندرت مسیر حرکت اتوبوس، گردش به راست و یا گردش به چپ دارد.

### ۲-۳ پارامترهای ترافیکی تقاطعات آماربرداری شده

در روش مبتنی بر تاخیر، نیاز به استخراج درجه اشباع  $(X)$  تقاطع برای محاسبه تاخیر در حالت پایه و مختلط است. برای به دست آوردن درجه اشباع لازم است برخی پارامترهای ترافیکی محاسبه شود. این پارامترها به ترتیب محاسبه عبارتند از: ۱- سرفاصله اشباع  $H_s(s)$ ، ۲- نرخ جریان اشباع  $S(\text{veh/h})$ ، ۳- نسبت سبز  $(g/C)$ ، و ۴- ظرفیت تقاطع  $c(\text{veh/h})$  است. در ابتدا مطابق با معادله ۱۰، سرفاصله اشباع محاسبه می‌گردد. سپس با قرار دادن  $H_s$  در معادله ۱۱، نرخ جریان اشباع  $(S)$  محاسبه می‌گردد. در ادامه با قرار دادن نرخ جریان اشباع و نسبت سبز در معادله ۱۲، مقدار ظرفیت هر گروه خط محاسبه می‌گردد. در نهایت، برای محاسبه درجه اشباع بایستی جریان عبوری از تقاطع بر ظرفیت تقاطع تقسیم گردد. جدول ۲، درجه اشباع تقاطعات آماربرداری شده را نشان می‌دهد. در معادله ۱۰،  $H_{ij}$  سرفاصله خودرو  $j$  در سیکل  $i$  است.

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j_s}^{n_i} H_{ij}}{\sum_{i=1}^m n_i - 4} \quad (10)$$

$$S = \frac{3600}{H_s} \quad (11)$$

$$c = \frac{g}{C} \times S \quad (12)$$

### ۴. روش پژوهش

نوع  $j$  است.  $n_j$  و  $PCE_j$  نیز تعداد و ضریب همسنگ خودروی نوع  $j$  و  $k$  تعداد انواع وسایل نقلیه غیر سواری است.

علیرغم اینکه روش‌های مذکور همگی منجر به تولید مقادیر پیشنهادی ضریب همسنگ می‌گردد، اما با این وجود یک سری تفاوت‌های اساسی میان این روش‌ها وجود دارد و می‌توان روش‌های مذکور را به دو دسته تقسیم کرد.

روش‌های دسته اول: روش‌هایی که داده‌های چندین چرخه متوالی از یک تقاطع را گرفته و در انتها به ازای تمام داده‌های برداشت از تمام چرخه‌های تقاطع، تنها یک ضریب همسنگ سواری معادل برای وسایل نقلیه پیشنهاد می‌دهد. در این روش به علت اینکه ضرایب همسنگ به ازای تک‌تک وسایل غیرسواری عبوری به طور جداگانه محاسبه نمی‌گردد، از این روش نمی‌توان تغییرات ضریب همسنگ را به صورت جزئی و دقیق محاسبه نمود. روش‌هایی نظیر سرفاصله زمانی، مولینا، بوستر و رگرسون روش‌هایی از این دسته است.

روش‌های دسته دوم: روش‌هایی که به ازای هر خودروی غیر سواری یک ضریب همسنگ پیشنهاد می‌دهد. به عنوان مثال اگر در یک تقاطع در طول مدت یک ساعت ۲۰ وسیله غیر سواری (اتوبوس) عبور کند، با استفاده از روش‌های دسته دوم، به ازای هر یک از این ۲۰ اتوبوس، یک ضریب همسنگ مجزا به خواهد آمد. بنابراین با استفاده از روش‌های دسته دوم به آسانی می‌توان تغییرات ضریب همسنگ را نسبت به عوامل مختلفی نظیر رفتار راننده، طول صف، موقعیت اتوبوس در صف و ... بیان نمود. روش‌هایی نظیر نرخ تخلیه صف، بهینه سازی، و روش تاخیر روش‌هایی از این دسته می‌باشند.

### ۳. گردآوری داده

در این پژوهش برای تعیین ضریب همسنگ، ۵ تقاطع شهر مشهد، خراسان رضوی انتخاب شد. برای محاسبه تاخیر بایستی سرفاصله زمانی خودروها برداشت گردد. استخراج اطلاعات سرفاصله خودروها، از فیلم‌های ضبط شده توسط دوربین‌های مرکز کنترل ترافیک در اردیبهشت ماه ۹۷ صورت گرفت.

عمادالدین خرازیان، ایمان آقایان، عبدالاحد چوپانی، عباس محمدی

هدف این بخش تشریح روش مبتنی بر تاخیر برای تعیین  
ضریب هم‌سنگ اتوبوس‌های درون شهری و شیوه محاسبه  
تاخیر پایه ( $d_0$ ) و تاخیر افزایشی ( $\Delta d$ ) در معادله ۶ است.

جدول ۱. برداشت داده‌های میدانی تقاطعات

رژیم جریان	نام تقاطع	ساعت آماربرداری	حجم تردد (veh/h)	حجم تردد در خط (veh/h/lane)	تعداد اتوبوس عبوری (در ساعت)	درصد اتوبوس عبوری
	خیام - سجاد	۱۱:۰۰-۱۳:۰۰	۱۵۰۲	۳۷۶	۱۰	۰/۷
فوق اشباع	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	۱۰:۰۰-۱۲:۰۰	۱۰۰۲	۳۳۴	۲۸	۲/۸
	کامیاب - عبادی (چهارراه راه آهن)	۱۳:۰۰-۱۵:۰۰	۱۳۴۱	۳۳۵	۱۰	۰/۷
	خیام سجاد	۱۵:۰۰-۱۷:۰۰	۹۱۶	۲۲۹	۷	۰/۸
زیر اشباع	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	۶:۰۰-۸:۰۰	۸۴۰	۲۸۰	۱۴	۱/۷
	معلم - دانشجو	۱۵:۰۰-۱۷:۰۰	۹۰۰	۳۰۰	۹	۱
	شاهد - امامیه	۱۲:۰۰-۱۴:۰۰	۱۰۴۶	۳۴۹	۱۰	۱

جدول ۲. درجه اشباع تقاطعات آماربرداری شده

رژیم تقاطع	تقاطع	سرفاصله اشباع (s)	نسبت سبز (g/C)	نرخ جریان اشباع (veh/h/lane)	ظرفیت تقاطع (veh/h/lane)	جریان عبوری (veh/h/lane)	درجه اشباع
	خیام - سجاد	۲/۰۹	۰/۱۸	۱۷۲۲	۳۱۰	۳۷۵	۱/۲۰
فوق اشباع	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	۲/۱۴	۰/۱۷	۱۶۸۱	۲۸۵	۳۳۴	۱/۱۷
	کامیاب - عبادی (چهارراه آهن)	۲/۰۱	۰/۱۶	۱۷۹۱	۲۸۶	۳۳۵	۱/۱۷
	خیام - سجاد	۲/۰۹	۰/۱۶	۱۷۲۲	۲۷۶	۲۲۹	۰/۸۳
زیر اشباع	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	۲/۱۴	۰/۲۲	۱۶۸۱	۳۷۰	۲۸۰	۰/۷۶
	معلم - دانشجو	۲	۰/۱۷	۱۸۰۰	۳۰۶	۳۰۰	۰/۹۸
	شاهد - امامیه	۲	۰/۲۸	۱۸۰۰	۵۰۴	۳۴۹	۰/۶۹

#### ۴-۱ برآورد تاخیر پایه

در تحقیق جاری روابط مورد استفاده برای محاسبه تاخیر پایه، معادله به کار رفته در HCM2016 و دیگری معادله نصیری و نادرنژاد [Nadernejad and Nassiri, 2010] است. طبق معادله ۱۳ تاخیر پایه یا تاخیر ناشی از سیستم کنترل، از دو جزء تاخیر یکنواخت ( $d_1$ ) و تاخیر تصادفی ( $d_2$ ) تشکیل می‌شود. تاخیر یکنواخت مربوط به تاخیر ناشی از چراغ است و تاخیر تصادفی مربوط به اثرات ورود اتفاقی و سایل نقلیه به صف و عدم تخلیه کامل تقاطع در یک چرخه است.

$$d_0 = d_1 + d_2 \quad (13)$$

روابط ۱۴ و ۱۵ روابط پیشنهادی HCM به ترتیب برای تعیین تاخیر یکنواخت و تصادفی است. روابط ۱۶ و ۱۷ نیز روابط پیشنهادی نادرنژاد و نصیری به ترتیب برای تاخیر

یکنواخت و تصادفی است. در روابط ۱۵ و ۱۷،  $x$  درجه اشباع یا همان نسبت حجم به ظرفیت است که می‌تواند بزرگتر و یا کوچکتر از یک باشد. از این رو مدل‌های مذکور، برای هر دو نوع جریان زیر اشباع و فوق اشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$d_1 = \frac{C}{2} \frac{(1 - \frac{g}{C})^2}{(1 - \frac{g}{C} * \min(1, x))} \quad (14)$$

$$d_2 = 900T[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8klx}{cT}}] \quad (15)$$

$$d_1 = \frac{(C - g_e)}{2} \quad (16)$$

$$d_2 = a[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{c}}] \quad (17)$$

در روابط فوق،  $d_1$  (s) تاخیر یکنواخت<sup>۱</sup> برای هر وسیله نقلیه با فرض ورود یکنواخت خودروها و  $d_2$  (s) تاخیر ناشی از ورود تصادفی است.  $C$  (s) طول چرخه چراغ راهنمایی است.  $T$  (hr) بازه تحلیل،  $k$  ضریب تاخیر اضافی ناشی از کنترل

هوشمند چراغ راهنمایی است و برای چراغ‌های از پیش‌زمان بندی شده عدد ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. I ضریب تصحیح ناشی از پلایش/سنجش تردد در بالادست<sup>۱۱</sup> است که برای تقاطعات منفرد برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. ge مدت زمان سبز موثر بر حسب ثانیه و در نهایت a ضریب ثابت (ضریب رگرسیون) بوده که مقدار آن برابر ۲۲۲/۶۸ است [Nadernejad and Nassiri, 2010].

#### ۴-۲ برآورد تاخیر افزایشی

تاخیر افزایشی ( $\Delta d$ ) (در معادله ۱۸) عبارت است از تاخیری که با اضافه شدن هر وسیله نقلیه سنگین به جریان ترافیک، بر هر وسیله نقلیه سواری اضافه می‌شود. مقدار آن برابر است با تفاضل تاخیر در جریان مختلط و جریان پایه تقسیم بر تعداد وسایل نقلیه سنگین عبوری.

$$\Delta d = \frac{D_t - D_0}{V_t} \quad (18)$$

$$\Delta d = \sum_{j=p}^m \sum_{k=p}^m (h_k^t - h_k^0) \quad (19)$$

لازم به ذکر است معادله شماره ۱۹ نیز شکل دیگری از معادله شماره ۱۸ است، با این تفاوت که معادله شماره ۱۸ جهت محاسبه ( $\Delta d$ ) از روابط تاخیر (روابط ۱۵ تا ۱۸) و معادله شماره ۱۹ از سرفاصله زمانی خودروها استفاده می‌کند.

که در آن،  $D_t(s)$  تاخیر کل در جریان مختلط،  $D_0(s)$  تاخیر کل در جریان پایه،  $V_t$  حجم وسایل سنگین موجود (veh/h)،  $h_k^0(s)$  سرفاصله وسیله نقلیه k ام در جریان مختلط،  $h_k^t(s)$  سرفاصله وسیله نقلیه k ام در جریان پایه، p و m نیز به ترتیب موقعیت اولین و آخرین وسیله نقلیه در صف است.

در جدول ۳ تاخیر اضافی  $\Delta d$  یکی از اتوبوس‌های عبوری از تقاطع در چرخه خروجی از تقاطع خیام سجاد با استفاده از معادله ۱۹ محاسبه شد. در ردیف ۱ و ۲، سرفاصله زمانی ۱۰ و وسیله نقلیه به ترتیب در دو جریان پایه و مختلط ارائه شده است. در ردیف ۳، مقادیر سرفاصله زمانی در هر موقعیت در جریان پایه از مقادیر سرفاصله زمانی در همان موقعیت در

جریان مختلط کسر می‌گردد. در ردیف ۴ نیز تاخیری که هر وسیله نقلیه ناشی از حضور اتوبوس تجربه می‌کند، محاسبه شد. این مقدار برای وسایل نقلیه موجود در موقعیت ۱ و ۲ صفر است؛ چون اتوبوس وسیله نقلیه سوم بوده و تاخیری به خودروهای جلویی خودش وارد نمی‌کند. ردیف چهارم، تاخیر هر خودرو را که ناشی از تاخیر خودش بعلاوه مجموع تاخیر خودروهای جلویی است، نشان می‌دهد. به عنوان مثال، ستون ۹ ردیف چهارم به این معنا است که خودرو سواری واقع در موقعیت ۹، مجموعاً ۱/۸۹ ثانیه متحمل تاخیر مازاد می‌شود که ۱/۷۶ ثانیه آن به خاطر تاخیر خودروهای جلویی (خودروهای ۱ تا ۸) و ۰/۱۳ ثانیه آن نیز صرفاً مربوط به تاخیر خودش است. در نهایت در ردیف ۵ مقادیر تاخیر اعمال شده ناشی از حضور اتوبوس بر روی تمام وسایل با هم جمع می‌شود که در این جا عدد ۱۴ ثانیه به دست آمده است. عدد مذکور بدین معنیست که مقدار ( $\Delta d$ ) ناشی از حضور یک اتوبوس در صف در چرخه خروجی از تقاطع مقدار ۱۴ ثانیه است.

چون در تقاطعات فوق‌اشباع اتوبوس در بیش از یک چرخه در تقاطع حضور دارد، تاخیر افزایشی ( $\Delta d$ ) نهایی حاصل جمع تاخیر افزایشی ( $\Delta d$ ) در هر کدام از چرخه‌های حضور در تقاطع است. مقدار  $\Delta d$  تعیین شده (۱۴ ثانیه) مربوط به چرخه‌ای است که اتوبوس از چرخه خارج می‌گردد یا تاخیر آخرین چرخه است. از آنجا که اتوبوس مورد نظر ۶ چرخه در تقاطع حضور دارد تاخیر افزایشی ایجاد شده در ۵ چرخه قبلی، برابر با ۱۱۸ ثانیه است. از این رو مجموع تاخیر افزایشی اتوبوس از لحظه ورود به تقاطع تا لحظه خروج از آن برابر است با ۱۳۲ (۱۱۸+۱۴) ثانیه.

#### ۵. نتایج

جدول ۴ تاخیر پایه تقاطعات منتخب را با استفاده از روابط نصیری و HCM نشان می‌دهد. همانگونه که جدول ۴ نشان می‌دهد در جریان‌های فوق‌اشباع، مقادیر  $d_i$  در روش HCM



ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌ها برای رژیم اشباع و فوق اشباع در تقاطع‌های چراغ‌دار

و نصیری با هم برابر هستند، چرا که مبنای محاسبه پارامتر  $d_1$  در هر دو روش، معادله وبستر است.

جدول ۳. محاسبه تاخیر مازاد سر فاصله افزایشی وسایل نقلیه در موقعیت‌های اول تا دهم صف

ردیف	موقعیت خودرو	۱	۲	۳*	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	$h_k^0$	۲/۹۳	۲/۳۹	۳/۹۹	۲/۷۳	۲/۰۶	۲/۳۲	۲/۰۵	۱/۹۸	۲/۱۵	۱/۸۸
۲	$h_k^t$	۲/۹۳	۲/۳۹	۲/۴۱	۲/۳۶	۲/۳۴	۲/۰۹	۲/۱۶	۱/۹۳	۲/۰۲	۱/۸۹
۳	$t_i = h_k^t - h_k^0$	۰	۰	۱/۵۲	۰/۳۶	-۰/۲۸	۰/۲۲	-۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۱۳	-۰/۰۱
۴	$\sum_{k=1}^{10} (h_k^t - h_k^0)$	۰	۰	۱/۵۲	۱/۸۸	۱/۶۰	۱/۸۲	۱/۷۱	۱/۷۶	۱/۸۹	۱/۸۸
۵	$\Delta d = \sum_{j=p}^m \sum_{k=p}^m (h_k^t - h_k^0)$	$۱۴ = ۰+۰+۱/۵۲+۱/۸۸+۱/۶۰+۱/۸۲+۱/۷۱+۱/۷۶+۱/۸۹+۱/۸۸$									

\* در این جدول، فرض شد که در چرخه‌ای که اتوبوس از تقاطع خارج شده، در موقعیت سوم صف بوده است.

جدول ۴. تاخیر پایه تقاطعات منتخب با استفاده از روابط نصیری و HCM

HCM2016			نصیری			تقاطع	رژیم تقاطع
$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_0$	$d_1$	$d_2$		
۹۹	۶۴	۳۵	۱۶۱	۶۴	۹۷	خیام - سجاد	
۸۰	۵۹	۲۱	۱۴۴	۵۹	۸۵	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	فوق اشباع
۹۰	۶۶	۲۸	۱۵۱	۶۶	۸۵	کامیاب - عبادی (چهارراه آهن)	
۵۵	۴۸	۷	۶۴	۵۰	۱۵	خیام سجاد	
۴۵	۳۹	۶	۴۶	۴۱	۵	جمهوری - کوشش (گاراژدارها)	زیر اشباع
۶۸	۶۰	۸	۷۹	۶۰	۱۹	معلم - دانشجو	
۳۴	۳۱	۳	۳۸	۳۷	۱	شاهد - امامیه	

برابر است با ۲/۳۳ و ۱/۷۹. دو مقدار به دست آمده اخیر مربوط به ضریب همسنگ یک اتوبوس عبوری از تقاطع است.

جدول ۵ مقادیر ضریب همسنگ اتوبوس (میانگین تمام اتوبوس‌های عبوری از تقاطع) را به تفکیک رژیم جریان نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر ضریب همسنگ برای تقاطعات فوق اشباع و زیر اشباع در روش HCM، به ترتیب برابر ۲/۳۳ و ۱/۱۱ است (جدول ۵). در روش نصیری، مقادیر ضریب همسنگ برای تقاطعات فوق اشباع و زیر اشباع، به ترتیب برابر ۱/۹۸ و ۱/۱۱ است (جدول ۵). در رژیم زیر اشباع به دلیل آزادی عمل خودروهای سواری در حجم تردد کم و خودداری آنها از قرارگیری در پشت اتوبوس، باعث می‌شود تا ضریب همسنگ اتوبوس تفاوت کمی با یک داشته باشد و ضریب

در هر تقاطع به ازای هر یک از اتوبوس‌های عبوری از تقاطع در طول دوره آماربرداری، یک ضریب همسنگ مجزا به دست می‌آید. ضریب همسنگ نهایی تقاطع با میانگین‌گیری از ضریب همسنگ تمام اتوبوس‌های عبوری از تقاطع به دست می‌آید. در این بخش محاسبه ضریب همسنگ یکی از اتوبوس‌های عبوری از تقاطع خیام - سجاد ارائه می‌شود. مقدار تاخیر افزایشی به دست آمده در بخش قبل (۴-۲-) برای یکی از اتوبوس‌ها برابر  $\Delta d = ۱۳۲۵$  است. مقدار تاخیر در جریان پایه نیز بر اساس دو روش HCM2016 و نصیری به ترتیب برابر  $d_0 = ۱۶۶۵$  و  $d_0 = ۹۹۵$  است (رژیم فوق اشباع تقاطع خیام - سجاد در جدول ۴). از اینرو بر اساس معادله ۱۲، مقادیر ضریب همسنگ بر اساس دو رابطه HCM2016 و نصیری به ترتیب

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

همسنگ کمی بیشتر از ۱ است و تاثیر اتوبوس همانند تاثیر یک سواری بر جریان ترافیک است.

جدول ۵. مقادیر ضریب همسنگ سواری با استفاده از دو معادله نصیری و HCM

رژیم تقاطع	فوق اشباع			زیر اشباع		
	خیام - سجاد	جمهوری - کوشش	کامیاب - عبادی	خیام - سجاد	جمهوری - کوشش	معلم - شاهد
HCM	۲/۳۲	۲/۲۹	۲/۴۰	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۱
روش نصیری	۱/۸۱	۱/۷۵	۱/۸۷	۱/۱۱	۱/۱۰	۱/۱۱

در این شکل، ضریب همسنگ اتوبوس در چرخه‌هایی که اتوبوس در موقعیت‌های ابتدایی صف است، نسبت به زمانی که اتوبوس در موقعیت‌های انتهایی صف قرار دارد، عدد بزرگتری است، چرا که هر چه اتوبوس به موقعیت‌های ابتدایی صف نزدیک باشد تعداد وسیله‌های نقلیه بیشتری در پشت اتوبوس حضور داشته و بنابراین تاخیر ناشی از حضور اتوبوس بر روی تعداد وسیله‌های نقلیه سواری بیشتری اعمال می‌گردد و در نهایت  $\Delta d$  عدد بزرگتری به دست خواهد آمد.

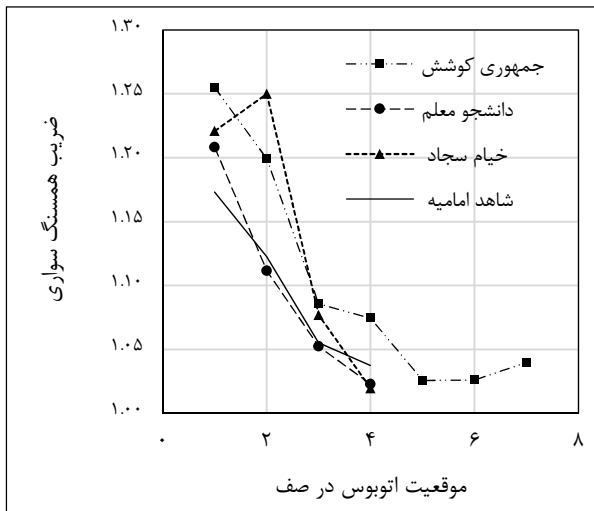
شکل ۲ میانگین سرفاصله زمانی خودروهای سواری در جریان پایه بر حسب موقعیت آن‌ها در صف را نشان می‌دهد. هنگام عبور از خط توقف، سرفاصله سواری‌های و سایل نقلیه ابتدای صف نسبت به سواری‌های انتهایی صف بزرگتر بوده و به عبارتی وسایل نقلیه موجود در ابتدای صف نسبت به وسایل نقلیه انتهایی صف با سرفاصله زمانی بیشتری از تقاطع عبور می‌کنند. این امر را می‌توان با روند نزولی ضریب همسنگ اتوبوس‌های عبوری از موقعیت‌های ابتدایی به انتهایی در صف توجیه کرد و به عبارتی اتوبوس‌های موجود در موقعیت‌های ابتدایی صف نسبت به اتوبوس‌های موجود در انتهایی صف با شتاب و سرعت عملکردی پایین تری از تقاطع عبور نموده و بنابراین ضریب همسنگ آن‌ها به مراتب بیشتر می‌باشد. جدول ۶ آماره‌های توصیفی ضرایب همسنگ در دو رژیم زیر اشباع و فوق اشباع را نشان می‌دهد. در جریان زیر اشباع ۵۰ درصد داده‌ها در بازه ۱/۰۳ تا ۱/۱۸ و دامنه بین چارکی<sup>۱۱</sup> آن برابر

چون در تقاطعات فوق اشباع، مقدار  $d_0$  بر اساس روش نصیری مقدار بزرگتری نسبت به روش HCM به دست می‌دهد، از این رو مخرج کسر در رابطه ۱۲ عدد بزرگتری بوده و ضریب همسنگ پیشنهادی بر اساس رابطه نصیری عموماً عدد کوچکتری نسبت مقدار پیشنهادی HCM می‌شود. چون در تقاطعات زیر اشباع مقدار پارامتر  $d_0$  در دو روش HCM و نصیری به هم نزدیک می‌باشند (جدول ۵)، ضریب همسنگ تقاطعات زیر اشباع، در این دو روش، دارای اختلاف ناچیزی هستند (جدول ۵).

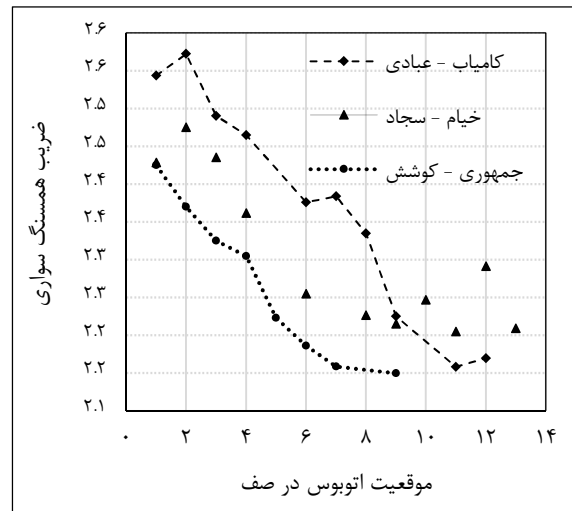
ضریب همسنگ در HCM برابر ۲ است، و نزدیک به ضریب همسنگی است که در تحقیق جاری برای رژیم فوق اشباع به دست آمد. پس می‌توان نتیجه گرفت ضریب همسنگ پیشنهادی HCM برای رژیم فوق اشباع مناسبتر است. اما این عدد برای تقاطعات زیر اشباع نسبتاً بزرگ است. در HCM مقادیر ضریب همسنگ برای دو رژیم زیر اشباع و فوق اشباع برابر ۲ در نظر گرفته شده و این بدین معنیست که اثرات منفی حضور اتوبوس در تقاطعات در دو رژیم زیر اشباع و فوق اشباع یکسان است. در حالی که در پژوهش جاری مشاهده می‌شود مقادیر ضریب همسنگ تقاطعات فوق اشباع با اختلاف قابل توجهی نسبت به مقادیر ضریب همسنگ تقاطعات زیر اشباع بزرگتر هستند. شکل ۱، ضریب همسنگ به ازای موقعیت‌های گوناگون اتوبوس در صف برای جریان فوق اشباع و زیر اشباع را با استفاده از معادله تاخیر HCM نشان می‌دهد.

ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌ها برای رژیم اشباع و فوق اشباع در تقاطع‌های چراغ‌دار

۰/۱۵ است. در جریان فوق اشباع ۵۰ درصد داده‌ها در بازه ۲/۲۲ تا ۲/۴۷ و دامنه بین چارکی آن برابر ۰/۲۵ است به دست آمده است.

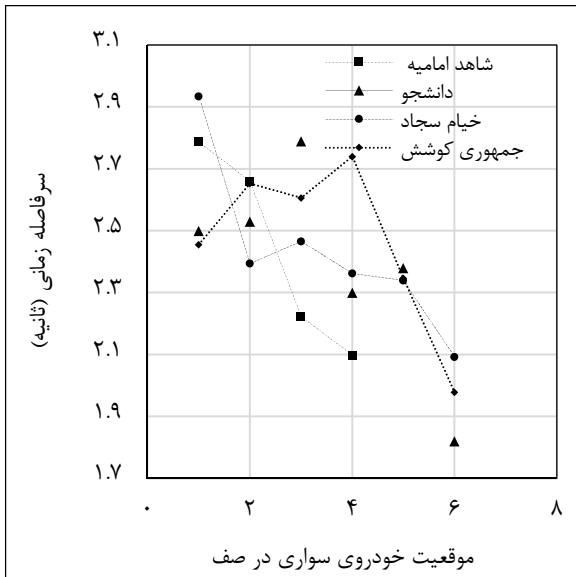


ب) زیر اشباع

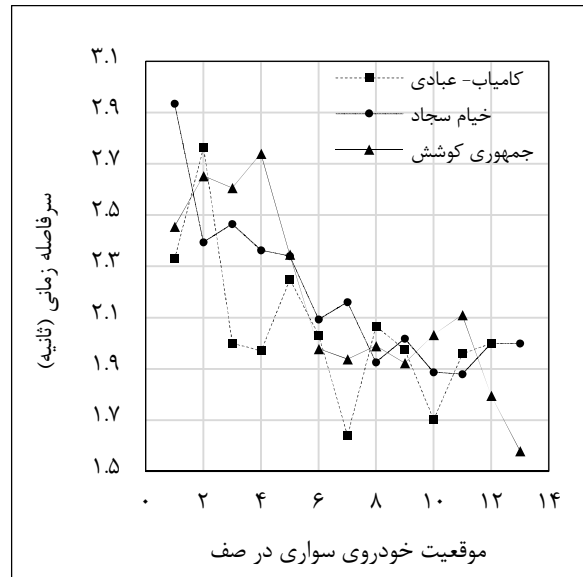


الف) فوق اشباع

شکل ۱. ضریب همسنگ به ازای موقعیت‌های گوناگون اتوبوس در صف



ب) زیر اشباع



الف) فوق اشباع

شکل ۲. میانگین سرفاصله زمانی خودروهای سواری در جریان پایه بر حسب موقعیت آن‌ها در صف

۱/۳۸	۲/۱۰۳	کمینه
۰/۰۹۱	۰/۱۶	انحراف معیار
۱/۰۳	۲/۲۲	چارک اول
۱/۱۸	۲/۴۷	چارک سوم

آماره / شاخص	فوق اشباع	زیر اشباع
تعداد مشاهدات	۶۳	۸۵
بیشینه	۲/۸۴۶	۱

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

۱/۱۱	۲/۳۳	میانه
۰/۰۸	۰/۶۸	ضریب تغییرات

### ۵-۱ مدل‌های پیش‌بینی ضریب همسنگ سواری

ضریب همسنگ سواری به پارامترهای ترافیکی درجه اشباع (یا حجم تردد خودروها)، درصد و سایل نقلیه سنگین و نسبت سبز وابسته است و عدد ثابتی نیست. عوامل فوق، از عوامل موثر در مقدار ضریب همسنگ سواری می‌باشند. از این رو در این بخش تغییرات ضریب همسنگ سواری تحت سه عامل ۱- درجه اشباع (حجم تردد خودروها)، ۲- درصد اتوبوس عبوری، و ۳- نسبت سبز بررسی می‌شود. در ادامه با تغییرات در سه عامل ذکر شده و گرفتن خروجی شاخص تاخیر پایه و تاخیر مختلط، مقدار ضریب همسنگ اتوبوس‌های درون شهری محاسبه شد. در نهایت مدل رگرسیون برای تخمین ضریب همسنگ بر اساس عوامل ذکر شده ارائه گردید. برای تغییرات هر کدام از متغیرهای نسبت سبز و درصد اتوبوس، ۴ سناریوی عددی در نظر گرفته شد. مقادیر نسبت سبز یا  $g/C$  عبارتند از: ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴ و همچنین در هر کدام از این ۴ حالت، ضریب همسنگ به ازای ۴ درصد مختلف اتوبوس درون شهری (۰/۲، ۰/۵، ۰/۸، ۰/۱۰) محاسبه می‌شود. تغییرات حجم ورودی به تقاطع به گونه‌ای در نظر گرفته شده که رژیم زیر اشباع تا فوق اشباع را پوشش دهد. با تغییر هر سناریو، حجم تردد ۲۰۰ (خودرو در ساعت) افزایش می‌یابد. جدول ۷ انواع سناریوهای پیاده‌سازی شده در نرم افزار ترافیکی Synchro را نشان می‌دهد. سناریوهای حجم تردد در این جدول ارائه شده است. تقاطع پیاده‌سازی شده یک تقاطع با شیب صفر و تعداد ۴ خط عبوری با عرض استاندارد ۳/۶۵ به ازای هر خط عبور است. همچنین شکل ۳، نمودارهای ضریب همسنگ سواری را بر حسب درجه اشباع (و حجم تردد رویکرد) نشان می‌دهد. در هر بخش این شکل، چهار دیاگرام ترسیم شده که هر کدام متعلق به یکی از درصدهای اتوبوس درون شهری است.

شکل ۳ نشان می‌دهد ضریب همسنگ برای درجه اشباع کمتر از ۰/۸، کمی بیشتر از یک است و با افزایش درجه اشباع، ضریب همسنگ با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. در درجه اشباع ۰/۸ تا ۱، شیب تغییرات تندتر می‌شود و در حالت اشباع، ضریب همسنگ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در رژیم اشباع که جریان ناپایدار است، ضریب همسنگ بیشترین مقدار را داراست و اتوبوس بیشترین تاثیر منفی را بر جریان ترافیک دارد. با افزایش درجه اشباع در رژیم فوق اشباع، ضریب همسنگ نیز کاهش می‌یابد؛ اما بدیهی است که میزان کاهش آنطور نیست که ضریب همسنگ در شرایط فوق اشباع و زیر اشباع با هم برابر گردد. در هیچ حالت فوق اشباعی، ضریب همسنگ کمتر از ۳ نمی‌شود.

در حالتی که  $g/C=0.4$  و درصد اتوبوس ۱۰ است، ضریب همسنگ برابر ۵/۵ و نزدیک به ۶ است. لذا می‌توان بیشترین مقدار ضریب همسنگ را برای تقاطعات اشباع برابر ۶ گرفت چرا که افزایش بیشتر  $g/C$  و درصد اتوبوس چندان متصور و منطقی نیست. چون در تقاطعات اشباع (یا فوق اشباع)، تعداد فازها زیاد است و سایر معابر و رویکردهای تقاطع نیز شلوغ بوده و نمی‌توان سبز (یا  $g/C$ ) اختصاص یافته به یک رویکرد را یکسویه افزایش داد. برای درصد اتوبوس، عدد ۱۰ عدد بالایی است. در داده‌های مشاهداتی برای تقاطعات فوق اشباع، درصد اتوبوس کمتر از ۳ بود (جدول ۱).

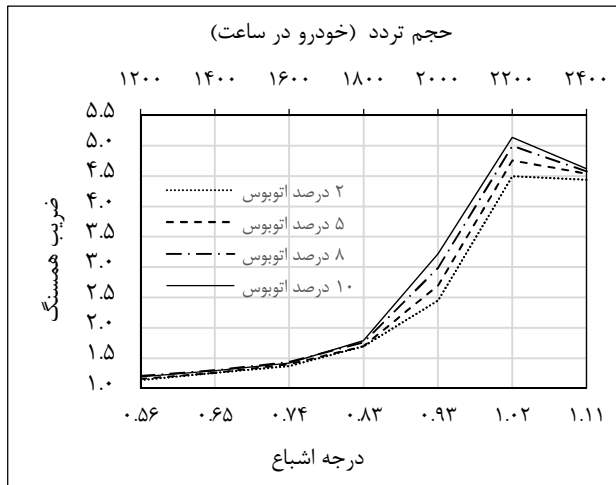
در درجه اشباع کم، درصد اتوبوس تاثیر چندانی بر ضریب همسنگ ندارد و ضرایب همسنگ به ازای درصدهای مختلف اتوبوس، تقریباً با هم برابر است. چنانچه درجه اشباع بیشتر از ۰/۸ شود، تاثیر درصد اتوبوس خود را نشان می‌دهد.

اگر چه شکل ۳، نمودارهای مفیدی برای استخراج ضریب همسنگ در شرایط مختلف ترافیکی ارائه می‌دهد، اما رابطه ریاضی بین ضریب همسنگ و عوامل تاثیرگذار بر آن را نشان نمی‌دهد. لذا بهتر است با برازش، روابط ریاضی بین ضریب همسنگ و عوامل تاثیرگذار به دست آید.

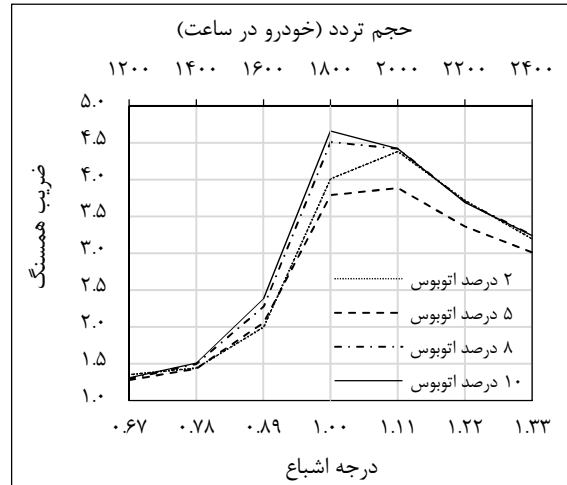
در ابتدا به نظر می‌رسید که نمودارهای شکل ۳ دارای دو بخش هستند. بخش ابتدایی آن خطی و مابقی آن سهمی است. یعنی اگر درجه اشباع کمتر از  $0/8$  باشد، رابطه بین ضریب همسنگ و حجم تردد (یا درجه اشباع) خطی است و اگر درجه اشباع بزرگتر از  $0/8$  باشد، این نمودار، سهمی است. اما برازش نمودار غیرخطی به داده‌ها برای درجه اشباع بزرگتر از  $0/8$ ، باعث دستیابی به ضرایب معنادار نشد و نتایج نشان می‌داد ارتباط بین ضریب همسنگ و متغیرهای تاثیرگذار، خطی است. لذا منحنی‌های خطی برازش داده شد و رژیم جریان به سه بخش زیر اشباع، نزدیک به اشباع، و فوق اشباع تقسیم شد.

جدول ۷. سناریوهای پیاده‌سازی شده در نرم افزار Synchro

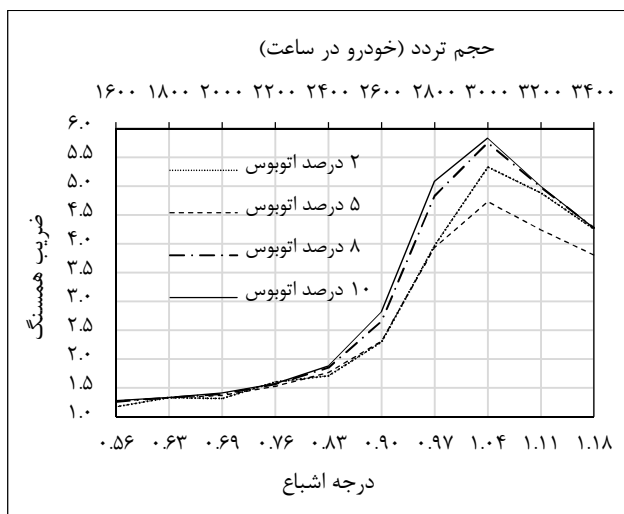
نسبت سبز	درصد اتوبوس عبوری	بازه حجم عبوری از تقاطع	رژیم زیر اشباع	رژیم اشباع	رژیم فوق اشباع	تعداد حالت‌های اجرا شده در نرم‌افزار
۰/۲۵	۱۰، ۵، ۲ و ۸	۱۲۰۰-۲۴۰۰	۱۲۰۰-۱۴۰۰	۱۸۰۰	۱۸۰۰-۲۴۰۰	۲۸
۰/۳	۱۰، ۵، ۲ و ۸	۱۲۰۰-۲۴۰۰	۱۲۰۰-۲۱۶۰	۲۱۶۰	۲۱۶۰-۲۴۰۰	۲۸
۰/۳۵	۱۰، ۵، ۲ و ۸	۱۴۰۰-۳۰۰۰	۱۴۰۰-۲۵۲۰	۲۵۲۰	۲۵۲۰-۳۰۰۰	۳۶
۰/۴	۱۰، ۵، ۲ و ۸	۱۶۰۰-۳۴۰۰	۱۶۰۰-۳۴۰۰	۲۸۸۰	۲۸۸۰-۳۴۰۰	۴۰



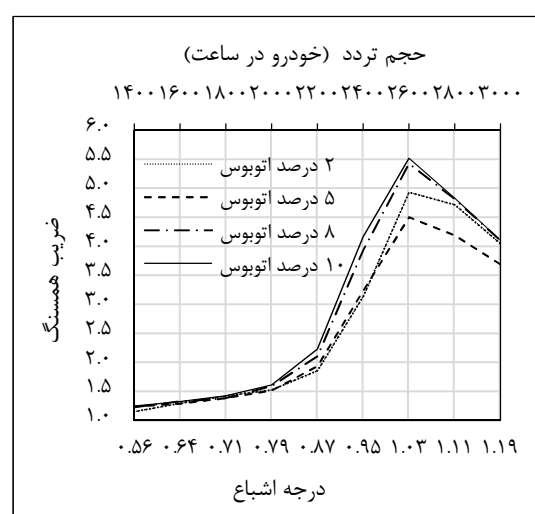
ب)  $g/C = 0.3$



الف)  $g/C = 0.25$



د)  $g/C = 0.4$



ج)  $g/C = 0.35$

شکل ۳. تغییرات ضریب همسنگ بر اثر عوامل موثر بر آن

جدول ۸ نتایج برازش خط را برای سه رژیم فوق نشان می‌دهد. ضریب همبستگی تمامی مدل‌ها بسیار خوب و بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۹ است. در تمامی مدل‌ها سه متغیر حجم تردد رویکرد (۷)، نسبت سبز ( $g/C$ )، و درصد اتوبوس (b) تاثیر معناداری بر ضریب هم‌سنگ دارد و آماره  $p$  (p-value) ضرایب آنها کمتر فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

درجه اشباع ۰/۸ و ۱ نقاط مرزبندی رژیم جریان بودند. به عبارتی اگر درجه اشباع کمتر از ۰/۸ باشد، رژیم جریان زیر اشباع و اگر درجه اشباع بیشتر از ۱ باشد، جریان فوق اشباع است. در غیراینصورت، جریان اشباع یا نزدیک به اشباع است.

## ضریب همسنگ سواری اتوبوس‌ها برای رژیم اشباع و فوق اشباع در تقاطع‌های چراغ‌دار

خط سواری‌ها برای قرار نگرفتن پشت سر اتوبوس وجود دارد و در نتیجه ضرایب همسنگ و عدد ثابت، کوچک و بین ۱ تا ۱/۵ است.

در شرایط فوق اشباع (جدول ۸ ج)، به دلیل محدودیت عمل سواری‌ها، امکان خودداری از قرار گرفتن پشت اتوبوس وجود ندارد و تاثیر اتوبوس بر جریان ترافیک بیشتر و ضریب همسنگ و عدد ثابت مدل بزرگتر شده است. طول یک اتوبوس برابر ۱۲ متر و طول خودرو اگر برابر ۴ متر در نظر گرفته شود، ضریب همسنگ تقریباً برابر ۳ می‌شود. طول پراید (صندوقدار) برابر ۱۳/۹۴ ست و تقسیم طول اتوبوس به سواری پراید عدد ثابت ۳/۰۵ را نتیجه می‌دهد، که دقیقاً برابر عدد ثابت مدل ج جدول ۸ (یعنی ۳/۰۵۱) است. عدد ثابت تاثیر نسبت طول اتوبوس به سواری را بر ضریب همسنگ در رژیم‌های مختلف جریان نشان می‌دهد. بنابراین، اعداد ثابت مدل‌ها اعدادی منطقی هستند. سایر عوامل نیز تاثیر کاهنده یا افزایشنده خود را (آنگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود) بر PCE دارند.

### ۶. نتیجه گیری

در این پژوهش ضرایب همسنگ سواری اتوبوس‌های درون شهری برای تقاطعات چراغ‌دار شهر مشهد محاسبه گردید. برای این منظور از ۳ تقاطع فوق اشباع و ۴ تقاطع زیر اشباع آماربرداری به عمل آمد و ضرایب همسنگ سواری تقاطعات آماربرداری شده بر اساس رابطه مبتنی بر تاخیر محاسبه گردید. مزیت روش تاخیر این است که جای اینکه تنها یک برآورد نقطه‌ای از ضریب همسنگ ارائه دهد، برای هر خودروی غیر سواری، یک ضریب همسنگ مجزا به دست می‌آید و دامنه‌ای از مقادیر ضریب همسنگ به همراه تغییرات آن، به دست می‌آید.

ضریب همسنگ اتوبوس در چرخه‌هایی که اتوبوس در موقعیت‌های ابتدایی صف است، نسبت به زمانی که اتوبوس در موقعیت‌های انتهایی صف قرار دارد، عدد بزرگتری است، چرا

از ۰/۰۵ است. تنها در رژیم زیر اشباع، آماره  $p$  در صد اتوبوس برابر ۰/۰۵۴ و اندکی بیشتر از ۰/۰۵ است که از این اختلاف کم اغماض شد. اعداد ثابت مدل‌ها و ضرایب آن نیز بسیار منطقی است. در تمامی سه رژیم، افزایش درصد اتوبوس، باعث افزایش ضریب همسنگ می‌شود.

جدول ۸ روابط خطی ضریب همسنگ سواری و عوامل موثر

الف) رژیم زیر اشباع ( $X < 0.8$ )						
R <sup>2</sup>	Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
	(Constant)	1.134	0.044		25.608	0.000
0.891	v	0.00054	0.000	1.377	19.479	0.000
	g/C	-2.039	0.167	-0.878	-12.185	0.000
	b	0.0043	0.002	0.098	1.977	0.054

ب) رژیم اشباع و نزدیک به اشباع ( $0.8 \leq X \leq 1$ )						
R <sup>2</sup>	Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
	(Constant)	1.482	0.428		3.461	0.002
0.887	v	0.00726	0.000	2.711	15.600	0.000
	g/C	-44.544	3.093	-2.511	-14.399	0.000
	b	0.068	0.023	0.182	2.938	0.006

ج) رژیم فوق اشباع ( $X > 1$ )						
R <sup>2</sup>	Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
	(Constant)	3.051	0.289		10.567	0.000
0.858	v	-0.00275	0.000	-1.775	-12.011	0.000
	g/C	25.971	1.728	2.221	15.025	0.000
	b	0.031	0.015	0.129	2.104	0.042

\* در این جدول، v حجم تردد رویکرد (خودرو در ساعت)، g/C نسبت سبز، و b در صد اتوبوس است. b بر حسب درصد است یعنی اگر ۵ درصد خودروها اتوبوس باشند، b=5.

همانگونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، چنانچه  $X \leq 1$  باشد، با افزایش  $X$  ضریب همسنگ نیز افزایش می‌یابد. در جدول ۸ الف و ب نیز برای رژیم زیر اشباع و اشباع، ضریب  $v$  مثبت است. قابل ذکر است که درجه اشباع برابر  $v/c$  یا همان حجم تردد به ظرفیت است. لذا بین حجم تردد ( $v$ ) و درجه اشباع ( $X$ )، رابطه مستقیمی وجود دارد. در شکل ۳ و جدول ۸ ج نیز اگر  $v/c > 1$  باشد، ضریب  $v$  منفی است.

در شرایط زیر اشباع و نزدیک به اشباع (جدول ۸ الف و ب)، عدد ثابت مدل پیش بینی ضریب همسنگ کمی بیشتر از یک است. در این شرایط، به دلیل حجم تردد کمتر امکان تغییر

۲. بررسی تأثیر عوامل هندسی تقاطع نظیر شیب زمین، عرض خط بر ضریب همسنگ،
۳. تعیین ضریب همسنگ سواری برای حرکات گردشی وسایل نقلیه سنگین،
۴. بررسی تأثیر توقف اتوبوس در ایستگاه‌های واقع در حوزه اثر تقاطع، و
۵. تعیین ضریب همسنگ برای تقاطعات سه راهی و میدانی.

### پی‌نوشت

- 1 passenger car equivalent (PCE)
- 2 queue clearance rate (QCR)
- 3 cumulative distribution function (CDF)
- 4 coefficient of variation
- 5 bottlenecks
- 6 incremental delay
- 7 headway ratio
- 8 time headway
- 9 degree of saturation
- 10 uniform delay
- 11 upstream filtering/metering adjustment factor
- 12 interquartile range

### ۷. مراجع

- افشاری، ابوالفضل و آیتی، اسماعیل (۱۳۹۸) "ارزیابی تأثیرات طرح هندسی و وضعیت ترافیک بر تخلیفات عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار شهری"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، دوره ۱۱، شماره ۲، ص. ۴۰۱-۴۲۴
- امینی، بهنام و شهزاد، شروین (۱۳۹۱) "ارزیابی مقایسه‌ای ضرایب همسنگ سواری وسایل نقلیه سنگین در راه‌های دوخطه دو طرفه ایران بر اساس روش‌های اختلاف سرعت و سرفاصله وسایل نقلیه"، پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال نهم، شماره چهارم، ص. ۳۳۹-۳۲۷.
- خاکی، علی منصور و ناصری فرد، حمید (۱۳۸۹) "محاسبه ضریب همسنگ سواری موتورسیکلت در

که هر چه اتوبوس به موقعیت‌های ابتدایی صف نزدیک باشد تعداد وسیله‌های نقلیه بیشتری در پشت اتوبوس حضور داشته و بنابراین تاخیر ناشی از حضور اتوبوس بر روی تعداد وسیله نقلیه سواری بیشتری اعمال می‌گردد.

ضریب همسنگ برای حجم به ظرفیت‌های کم، کمی بیشتر از یک است و با افزایش  $v/c$ ، ضریب همسنگ با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. در حجم‌های نزدیک به اشباع، شیب تغییرات تندتر می‌شود و در حالت اشباع، ضریب همسنگ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش  $v/c$  در حالت فوق اشباع، ضریب همسنگ نیز کاهش می‌یابد؛ اما بدیهی است که میزان کاهش آنطور نیست که ضریب همسنگ در شرایط فوق اشباع و زیر اشباع با هم برابر گردد. در هیچ حالت فوق اشباعی، ضریب همسنگ کمتر از ۳ نمی‌شود. در حالت اشباع که جریان ناپایدار است، ضریب همسنگ بیشترین مقدار را داراست و اتوبوس بیشترین تأثیر منفی را بر جریان ترافیک دارد.

مدل‌های ریاضی بر اساس ۳ متغیر حجم تردد رویکرد، در صد اتوبوس عبوری از تقاطع؛ و نیز نسبت سبز برای سه رژیم زیر اشباع، فوق اشباع، و اشباع (یا نزدیک به اشباع) ارائه گردید. ضریب همبستگی تمامی مدل‌ها بسیار خوب و بین ۰/۸۵ تا ۰/۹ است. در تمامی مدل‌ها سه متغیر حجم تردد رویکرد ( $v$ )، نسبت سبز ( $g/c$ )، و درصد اتوبوس ( $b$ ) تأثیر معناداری بر ضریب همسنگ دارد و آماره  $p$  ضرایب آنها کمتر از ۰/۰۵ است. اعداد ثابت مدل‌ها و ضرایب آن نیز بسیار منطقی است. به ترتیب عوامل حجم تردد و نسبت سبز تأثیرگذارترین متغیرها بر ضریب همسنگ هستند. درصد اتوبوس تأثیری کمتر، ولی از نظر آماری با اهمیت، بر ضریب همسنگ دارد.

برای مطالعات آتی، پیشنهادهای به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱. تعیین ضریب همسنگ سواری برای سایر وسایل نقلیه (مانند مینی‌بوس، وانت، موتورسیکلت، کامیون تک قسمتی و دو قسمتی و ...)



- Greenshields, B., Shapiro, D. and Erickson, E.I. (1946) "Traffic performance at urban intersection", Technical Report No. 1, Bureau of Highway Traffic, Yale University, New Haven, Connecticut.
- Lee, C. (2015) "Developing passenger-car equivalents for heavy vehicles in entry flow at roundabouts", ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 141, No. 8, pp. 04015013.
- Mohan, M., Chandra, (2016) "Concept of queue clearance rate for estimation of equivalency factors at priority junctions", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 43, No. 7, pp. 593-598.
- Mohan, M. and Chandra S. (2017) "Queue clearance rate method for estimating passenger car equivalents at signalized intersections", Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Vol. 4, No. 5, pp 487-495.
- Molina, C.J. (1987) "Development of passenger car equivalencies for large trucks at signalized intersections", ITE Journal, Vol. 57, No. 11.
- Nadernejad, M. and Nassiri, H. (2010) "Modeling of oversaturation delay at signalized intersection", International road federation Conference, Lisbon, Portugal, May 2010.
- Nassiri, H., Tabatabaie, S. and Sahebi, S. (2017) "Delay-based passenger car equivalent at signalized intersections in Iran", Promet-Traffic&Transportation, Vol., 29, No. 2, pp. 135-142.
- Radhakrishnan, P. and Mathew, T.V. (2011) "Passenger car units and saturation flow models for highly heterogeneous traffic at urban signalised intersections", Transportmetrica, Vol. 7, No. 2, pp. 141-162.
- تقاطع‌های چراغ‌دار براساس تحلیل تاخیر"، دهمین کنفرانس بین‌المللی حمل و نقل و ترافیک، اسفند ۱۳۸۹.
- شکیبایی، فائز و بهزادی، غلامعلی "برآورد ضریب همسنگ سواری خودروی ون در معابر درون شهری با استفاده از AIMSUN (نمونه موردی: معبر امام رضا شهر آمل)" پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی حمل و نقل و ترافیک، اسفند ۱۳۹۴.
- Ahmed, U. and Cetin, M. (2017) "Impacts of heavy vehicles on inter-vehicle interactions and passenger car equivalents for tunnel traffic", Case Studies on Transport Policy, Vol. 5, No. 4, pp. 580-586.
- Ahmed, U., Drakopoulos, A., and Ng, M.W. (2013) "Impact of heavy vehicles on freeway operating characteristics under congested conditions", Transportation Research Record, Vol. 2396, No. 1, pp. 28-37.
- Benekohal, R.F. and Zhao W. (2000) "Delay-based passenger car equivalents for trucks at signalized intersections", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 34, No. 6, pp. 437-457.
- Branston, D. and P. Gipps, (1981) "Some experience with a multiple linear regression method of estimating parameters of the traffic signal departure process". Transportation Research Part A: General, Vol. 15, No. 6, pp. 445-458.
- Geistefeldt, J. (2009) "Estimation of passenger car equivalents based on capacity variability", Transportation Research Record, Vol. 2130, pp. 1-6.
- Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M.L. and Sferlazza, A. (2017) "Estimation of passenger car equivalents for single-lane roundabouts using a microsimulation-based procedure", Expert Systems with Applications, Vol. 79, pp.333-347.

- signals in road research lab”, Road Research Lab. Res. Note No. RN/3313/FVW. BR, 587.
- Zhao, W. (1996) “Development of a methodology for measuring delay-based passenger car equivalent for heavy vehicles at signalized intersections”, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, the University of Illinois at Urbana-Champaign.
  - Shalini, K. and Kumar, B. (2014) “Estimation of the passenger car equivalent: A review”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 4, No. 6, pp. 97-102.
  - Transportation Research Board. (2016) “Highway Capacity Manual”, National Research Council, Washington, D.C.
  - Webster, F. (1958) “Controlled experiment on the capacity of junctions with traffic

عمادالدین خرازیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه بیرجند و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری در سال ۱۳۹۸ را از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، شبیه سازی جریان ترافیک، بررسی رفتار رانندگان در تقاطعات چراغ‌دار است.



ایمان آقایان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۸۴ از دانشگاه صنعتی شاهرود و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری در سال ۸۷ را از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه مدیترانه شرقی کشور قبرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک، سیستم‌های هوشمند حمل و نقل، شبیه سازی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



عبدالاحد چوپانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، برنامه ریزی حمل و نقل، و ایمنی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



عباس محمدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی آب را در سال ۱۳۳۸ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در سال ۱۳۷۴ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۸۳ موفق به کسب درجه دانشوری در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، شبیه سازی جریان ترافیک، و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه مربی در دانشگاه صنعتی شاهرود است.

