مکانیابی بهینه شمارشگرهای ترافیکی در شبکه برای به روز رسانی ماتریس تقاضای سفر با استفاده از استنباط بیزین (مطالعه موردی:شهر اصفهان)

هادی کریمی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

علی ابراهیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

سید نادر شتاب بوشهری، دانشیار، دانشکده صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

E-mail: h.karidehnavi@in.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۰۳/۰٦ پذیرش:۱۳۹٤/۱۰/۲٦

چکیده

تحلیل جریانهای ترافیکی در شبکه های حمل و نقل شهری نیازمند اطلاعات ماتریس تقاضای سفر است. اطلاعات ماتریس تقاضای سفر معمولا از دو دسته روش های مستقیم و غیرمستقیم به دست می آید. از آنجایی که جمع آوری اطلاعات مربوط به این ماتریس از طریق روشهای مستقیم، هزینه بر بوده، بنابراین در سال های اخیر روش های غیر مستقیم برای اصلاح و به روز رسانی ماتریس یاد شده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از مهمترین روشهای غیر مستقیم اصلاح ماتریس تقاضای سفر، استفاده از مدلهای برنامه ریزی ریاضی با استفاده از اطلاعات حجم جریان ترافیک مشاهده شده بر روی خیابانهاست. با توجه به اینکه کیفیت ماتریس تقاضای سفراصلاح شده به دقت داده های ورودی مانند ماتریس تقاضای سفر اولیه و محل استقرار نقاط شمارش حجم جریان ترافیک وابسته بوده، و از طرف دیگر منابع تخصیص داده شده برای شمارش حجم خیابانها محدود است، بنابراین انتخاب مجموعه ای از کمانهای مناسب که شمارش حجم آنها بیشترین اطلاعات را برای تصحیح ماتریس تقاضای سفر به دست دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله رویکردهایی که سال های اخیر در تعیین محل بهینه کمانهای شبکه جهت شمارش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، رویکرداستنباط بیزی و استفاده از شبکه های بیزین است. مشکل اصلی این روشها، زمان اجرای بالای آنها برای شبکه های متوسط و بزرگ است. در این تحقیق با استفاده از دو راهکار شناسایی کمانهای غیر مهم و حذف آنها و نیز کاهش تعداد زوج مبدا-مقصدهای غیر موثر، روشی کارآ برای شناسایی کمانهای مهم جهت شمارش در شبکه های حمل و نقلی بزرگ ارائه شده است. در نهایت روش پیشنهادی بر روی شبکه متوسط سایوکس فالز و سپس بر روی شبکه بزرگ شهر اصفهان اجرا شد و کمانهای بهینه برای شمارش حجم ترافیک در راستای تخمین ماتریس تقاضای سفر تعیین گردید.

واژه های کلیدی : مکانیابی بهینه کمانهای شبکه، تخمین ماتریس تقاضای سفر، شبکه های بیزین

۱. مقدمه

رشد و توسعه جوامع شهری، سبب افزایش نیاز این جوامع به خدمات همگانی و اجتماعی شده‌است. انجام بسیاری از فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی نیازمند تسهیلات حمل‌ونقلی است.این موضوع، لزوم توجه به برنامه‌ریزی صحیح در حیطه حمل‌ونقل را مورد تأکید قرار می‌دهد. هدف از برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل، طراحی نزدیک به بهینه مجموعه تسهیلات حمل‌ونقل موجود و روش‌های بکارگیری آن‌هاست. همچنین هدف دیگر برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل، به‌کارگیری تسهیلات حمل‌ونقل جدید در آینده است، به‌گونه‌ای که با توجه به تسهیلات حمل‌ونقل موجود، اهداف مورد نظر به بهترین وجه ممکن ارضا گردند. تحلیل و برنامه ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل نیازمند تخمین تقاضای فعلی و پیش-بینی تقاضای آینده است. به‌عبارت دیگر، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری بدون آگاهی از تقاضای سفر اگر ناممکن نباشد بسیار دور از ذهن است. اطلاعات مربوط به تقاضای سفر منطقه‌ی مورد مطالعه، در ماتریسی تحت عنوان ماتریس تقاضای سفر ذخیره می‌شود.

روش های مستقیم جمع آوری اطلاعات مربوط به ماتریس تقاضای سفر رامعمولادر سه گروه دسته بندی می کنند. دسته اول روشهای مشاهده‌ای هستند که با مشاهده وضع ترافیک و برداشت اطلاعات لازم از این مشاهدات به برآورد حجم سفرهای مبدأ-مقصد می‌پردازند. نمونه‌ای از این روش‌ها ثبت شماره وسایل نقلیه است. دسته دوم روش‌های پرسشنامه‌ای هستند که اطلاعات مورد نیاز را از طریق توزیع پرسشنامه گردآوری می‌کنند و دسته سوم روش های مصاحبه ای هستند که اطلاعات مورد نیاز را از طریق مصاحبه از افراد جامعه آماری به‌دست می آورند. با توجه به هزینه‌ی بالای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تقاضای سفر از طریق روش مستقیم، جمع‌آوری این‌گونه اطلاعات در فواصل زمانی کوتاه میسر نیست. بنابراین برای اصلاح و به‌روزرسانی ماتریس تقاضای سفر روش‌های غیر مستقیم مورد توجه پژوهشگران قرارگرفته‌است. یکی از روش‌های مهم، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای اصلاح و به‌روزرسانی ماتریس تقاضای سفر به کمک مشاهدات حجم جریان ترافیک بر روی برخی از خیابان‌ها است. در این روش حجم ترافیک در بعضی از خیابان‌های شبکه در ساعت‌هایی خاص شمارش می‌شود. با استفاده از این اطلاعات و به‌کارگیری روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی، ماتریس تقاضای سفر موجود تصحیح می شود. همچنین می‌توان برای به‌روزرسانی ماتریس‌های تقاضای سفر قدیمی، از این روش استفاده نمود که این عمل هزینه جمع‌آوری اطلاعات برای تخمین ماتریس تقاضا را به شدت کاهش می‌دهد. از آن‌جا که کیفیت ماتریس تقاضای سفر تخمین‌زده شده به دقت داده‌های ورودی نظیر ماتریس تقاضای سفر اولیه و همچنین، محل استقرار نقاط شمارش ترافیک وابسته است، و از طرفی منابع تخصیص داده‌شده (تجهیزات، بودجه و ...) برای شمارش حجم خیابان‌ها محدود می باشد، بنابراین انتخاب مجموعه‌ای از کمان‌های مناسب (کمان‌هایی که شمارش حجم آن‌ها بیشترین اطلاعات را برای تصحیح ماتریس تقاضای سفر به ما می‌دهند) بسیار مهم است.

در سال های اخیر روش‌هایی برای تعیین کمان‌هایی که شمارش حجم ترافیک در آن‌ها بیشترین اطلاعات را برای تخمین ماتریس تقاضای سفر مبدأ-مقصد به‌دست می‌دهند، ارائه شده‌است. یکی از افرادی که در جهت توسعه روش بیزین برای تخمین ماتریس تقاضای سفر، فعالیت‌های زیادی انجام داده انریکو کستیلو است. کستیلو و همکارانش[Castillo, Menendez, and Sanchez, 2008] با استفاده از شبکه‌های بیزین و با کمک شمارش حجم ترافیک تعدادی از کمان‌های شبکه، ماتریس تقاضای سفر منطقه مورد مطالعه خود را تخمین زدند.

هدف این پژوهش اصلاح روش کستیلو جهت انتخاب کمان‌های بهینه شمارش حجم جریان و در نهایت ارائه روشی ابداعی جهت انجام این کار است. این روش قابلیت به‌کارگیری در شبکه‌های بزرگ و شلوغ را دارد.

۱. مساله مکانیابی شمارش شبکه و تخمین ماتریس تقاضای سفر

اصلاح و به روز رسانی ماتریس تقاضای سفر به دقت داده‌های ورودی نظیر حجم جریان کمان‌های شبکه، ماتریس اولیه، و همچنین تعداد و محل استقرار نقاط شمارش ترافیک وابسته است. هر کاستی در این اطلاعات باعث انحراف عناصر ماتریس تقاضای سفر از مقدار

واقعی می‌شود. ادبیات نشان می‌دهد که کیفیت ماتریس تخمین زده شده به چندین عامل مانند فروض و روش تخصیص ترافیک، کیفیت داده های به‌دست آمده از شمارشگرها، وابستگی بین جریان کمانها، انتخاب روش تخمین ماتریس تقاضای سفر و مکان قرار گیری شمارشگرهای ترافیکی وابسته است. آخرین فاکتور بدلیل اینکه تعداد شمارشگرهایی که در شبکه قرار می گیرند، معمولا بوسیله بودجه در دسترس و دیگر ملاحظات، محدود می‌شود، بسیار مهم است[Wang, Gentili and Mirchandani, 2012].

مساله ای که به مکانیابی بهینه استقرار شمارشگرهای ترافیکی به منظور به‌دست آوردن بیشترین اطلاعات بر روی یک شبکه می پردازد، به نام مساله مکانیابی شمارشگرهای شبکه[1]شناخته می شود [Viti et al. 2014]. در طول سه دهه اخیر، تلاش‌های زیادی جهت تخمین ماتریس تقاضای سفر با استفاده از اطلاعات حجم جریان برخی کمان‌ها انجام پذیرفته‌است، و پیشرفت‌های زیادی هم در این زمینه حاصل شده‌است، و لیکن در برابر فعالیت‌های صورت گرفته برای تخمین این ماتریس، تحقیقات اندکی برای تعیین تعداد و محل بهینه شمارش‌گرهای ترافیک انجام پذیرفته‌است. در این بخش مروری بر تحقیقات انجام گرفته برای انتخاب بهترین کمان‌ها برای شمارش خواهدشد.

اولین تلاش‌ها جهت تعیین تعداد و محل بهینه شمارشگرهای جریان کمان‌ها توسط لم و لو [Lam and Lo, 1990] صورت گرفت. آن دو روشی ابتکاری را جهت یافتن کمان‌هایی که باید شمارش شوند ارائه کردند که این روش توسط یم و لم توسعه یافت [Yim and Lam,1998]. این پژوهشگران الگوریتمی ابتکاری ارائه کردند که در آن با استفاده از روش نمونه‌گیری، کمان‌هایی که اهمیت بیشتری داشتند از قبل در اولویت انتخاب قرار داده‌شدند.

هاگسون [Hodgson,1990] در مطالعات خود با ارائه یک روش ابتکاری فرض کرد که همه جریان‌های میان هر زوج سفر کوتاه‌ترین مسیر را انتخاب می‌کنند. او با این فرض توانست پیچیدگی مسئله را تا حد زیادی کاهش دهد و آن را برای شبکه‌ای با ۲۵ گره حل کند.

دو پژوهش [Berman,Larson and Fouska, 1992] و [Berman, Bertsimas and Larson,1992] بر اساس فرضیه ی هاگسون مدل وی را برای تعیین تعداد و محل بهینه شمارش جریان کمان‌ها توسعه دادند. هدف آن‌ها یافتن مجموعه کمان‌هایی برای قرار دادن تعدادی تسهیلات در شبکه بود. برای این منظور روش آن‌ها سعی در انتخاب کمان‌هایی داشت که بیشترین اطلاعات از شبکه را ارائه دهد. روش ابتکاری این محققان بر فرض وجود اطلاعات حجم جریان تمامی مسیرها و در نتیجه حجم جریان تمامی زوج مبدأ-مقصدها استوار بود. با توجه به این ضرورت کاملاً واضح است که این روش قابلیت بکارگیری برای شبکه‌های بزرگ را ندارد و فقط می‌توان از آن برای شبکه‌های کوچک بهره برد.

یانگ و همکارانش [Yang, Iida, and Sasaki,1991] با یک بررسی تئوری قابلیت اعتماد ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد تخمین زده شده را بر اساس ماکزیمم خطای نسبی مجاز[2] (*MPRE*) مورد سنجش قرار دادند. آن‌ها پس از تحلیل دقیق خصوصیات شاخص حداکثر خطای نسبی مجاز (*MPRE*)در رابطه با نقاط بهینه شمارش حجم جریان کمان‌ها، ماکزیمم خطای نسبی مجاز را با یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی درجه دوم ساده فرمول‌بندی کردند و نشان دادند که *MPRE* در واقع حد بالایی خطای نسبی حقیقی برای ماتریس تقاضای سفر واقعی است، و نقشی تعیین‌کننده را در تحلیل قابلیت اعتماد ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد تخمین زده شده دارد.

یکی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام گرفته در تعیین محل شمارشگرهای ترافیکی توسط یانگ و ژو [Yang and Zhou, 1998] بر اساس کار قبلی یانگ و همکارانش انجام گرفت که نتایج حاصل از آن منشا انجام بسیاری از تحقیقات بعدی بوده است. این پژوهشگران یک روش سیستماتیک برای تعیین تعداد و محل بهینه‌ی کمان‌هایی که باید شمارش شوند ارائه کردند، که در نهایت به تعریف چهار قانون که در انتخاب محل بهینه شمارشگرهای ترافیکی مهم و کاربردی است، منجر گردید. این چهار قانون به شرح زیر اند:

۱- قانون پوشش همه زوج مبدأ- مقصدها[۳] : کمان‌هایی که برای شمارش ترافیک در یک شبکه حمل‌ونقل انتخاب می‌شوند، باید به گونه‌ای باشند که بتوان نسبت معینی از سفرهای بین هر زوج سفر را مشاهده کرد.

۲- قانون حداکثر نسبت جریان[٤] : برای یک زوج سفر خاص، کمان-های بهینه برای شمارش حجم جریان باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نسبت حجم جریان بین این زوج مبدأ-مقصدها روی آن کمان‌ها بیشترین مقدار ممکن باشد.

۳- قانون حداکثر شمارش جریان[٥]: تا حد امکان، کمان‌هایی که برای شمارش حجم جریان در یک شبکه حمل‌ونقل انتخاب می‌شوند باید بیشترین جریان وسایل نقلیه را داشته‌باشند.

٤- قانون استقلال کمان[٦] : محل‌های شمارش ترافیک باید روی بخشی از شبکه حمل‌ونقل واقع شوند که برآیند شمارش ترافیک روی کمان‌های انتخاب شده وابسته‌ی خطی نباشد.

البته پژوهشهای انجام گرفته بعدی مانند [Larsson, Lundgren, and Peterson, 2010]، [Cipriani et al. 2006] و [Yang, Yang and Gan, 2006] قوانین جدیدی در راستای تکمیل قوانین یانگ و ژو [Yang and Zhou, 1998] معرفی نمودند. جنتیلی و میرچندانی [Gentili and Mirchandani, 2012] قوانین یانگ و ژو و همچنین قوانین تکمیلی را فرمول نویسی نمودند و با اعمال آنها بر روی شبکه های فرضی با ابعاد متفاوت، نشان دادند که هیچ کدام از قوانین نمی تواند برای همه شبکه ها و سناریو ها بوسیله دیگر قوانین مغلوب شود.

یانگ و ژو پس از تعریف قوانین چهارگانه، مدل خود را برای تعیین کمان‌های بهینه ارائه کردند. آن‌ها ابتدا حداقل تعداد نقاط شمارشی را که بتواند با قانون پوشش همه مبدأمقصدها مطابقت داشته‌باشد، با یک ماتریس تقاضای سفر اولیه و همچنین الگوی سفر، تعیین کردند. پس از آن مسئله برنامه‌ریزی ریاضی زیر را برای تعیین حداقل کمان‌ها جهت شمارش تعریف کردند:

$$Min\ Z(z) = \sum_{a\in A} Z_a$$
$$\sum_{a\in A} \delta_{aw} Z_a \geq 1, \quad w \in W \qquad (۱)$$
$$Z_a = 0,1 \ , \ a \in A$$

که در این‌جا W مجموعه زوج مبدأ-مقصدهای شبکه، A مجموعه کمان‌های شبکه، δ_{aw} یک متغیر دوتایی صفر و یک است که اگر تعدادی از سفرهای زوج مبدأ-مقصدهای $w \in W$ از کمان $a \in A$ بگذرد $\delta_{aw}=1$ است، و در غیر این صورت $\delta_{aw}=0$. همچنین، Z_a نیز متغیری صفر و یک است که اگر نقطه‌ی شمارش جریان روی کمان a باشد، $Z_a = 1$ و در غیر این صورت $Z_a = 0$ است.

یانگ و ژو همچنین مسئله برنامه‌ریزی زیر را برای بیشینه‌کردن حجم جریان شمارش‌شده تعریف کردند:

$$\text{Max } F(z) = \sum_{r\in R} f_r y_r$$
$$\sum_{a\in A} Z_a = \hat{l}$$
$$\sum_{a\in r} Z_a \geq y_r \ , \ r \in R \qquad (۲)$$
$$\sum_{a\in A} \delta_{aw} Z_a \geq 1, \quad w \in W$$
$$Z_a = 0,1 \ , \ y_r = 0,1 \ , \ a \in A \ , \ r \in R$$

که در این‌جا R مجموعه مسیرها، y_rمتغیر صفر و یکی است که اگر حداقل یک نقطهی شمارش در مسیر r باشد $y_r = 1$ و در غیر این صورت $y_r = 0$، و f_r حجم جریان مسیر r مربوط به تخصیص ماتریس تقاضای سفر اولیه به شبکه است. A، W، Z_a و δ_{aw} هم تعاریفی مانند مسئله‌ی قبل دارند.

در نهایت یانگ و ژو با توجه به دو مسئله‌ای که تعریف کردند الگوریتم ابتکاری طراحی کردند که محل بهینه شمارش‌گرهای حجم جریان را به‌دست می‌آورد، که این الگوریتم با توجه به متغیرهای صفر و یکی که تعریف کرده بودند قابلیت اطمینان بالایی را برای ماتریس تقاضای سفر تخمین زده شده به‌دست نمی‌داد.

تمامی روش‌های ارائه شده تا به امروز از قوانین چهارگانه یانگ بهره می‌برند. در دهه‌ی اخیر با پیشرفت تکنولوژی و نصب دوربین‌ها و سنسورهای کنترل ترافیکی، تحولی در روش‌های تعیین کمان‌های بهینه برای شمارش حجم جریان پدید آمده‌است. برای مثال چانگ [Chung, 2001] در پایان‌نامه دکترای خود هزینه نصب و راه‌اندازی دوربین‌های کنترل ترافیک را جهت مشاهده جریان ترافیک به مسئله تعیین محل‌های شمارش اضافه کرد، و دو مسئله جداگانه را تعریف کرد. مسئله اول چانگ، منابع

مالی را با محدودیت پوشش همه زوج مبدأ- مقصدها کمینه می‌کند، و مسئله دوم پوشش زوج مبدأ-مقصدها را با محدودیت بودجه بیشینه می‌کند.

با توجه به این‌که برای شبکه‌های متوسط تا بزرگ پوشش کامل زوج مبدأ-مقصدها اغلب غیرممکن است، و نیز با در نظر گرفتن این‌که برخی از زوج مبدأ-مقصدها دارای اطلاعات بیشتری نسبت به بقیه هستند، الرت و همکارانش مفهوم میانگین اطلاعات را به مدل‌های یانگ و چانگ اضافه کردند [Ehlert, Bell and Grosso, 2006]. نظریه اطلاعات اولین بار توسط نیکویست [Nyquist, 1924] در سال ۱۹۲٤ و هارتلی [Hartley, 1928] در سال ۱۹۲۸ ارائه شد، که به برخی از مفاهیم اصلی آن پرداخته‌اند. ون زویلن و ویلیامسن در سال ۱۹۸۰ مفهوم اطلاعات را در مسئله برآورد ماتریس تقاضای سفر بکار گرفتند[Van Zuylen, Willumsen, 1980]. مفهوم میانگین اطلاعات یک جریان زوج سفر بیانگر نسبت زیر است [Ehlert, Bell and Grosso, 2006] :

$$H_w = -P_w ln P_w \qquad (۳)$$

که در این‌جا P_w احتمال سفر در زوج سفر w نسبت به همه زوج مبدأ-مقصدها بوده، که این احتمال برای هر زوج سفر با توجه به ماتریس تقاضای سفر اولیه به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$P_w = t_w / \sum_w t_w \qquad (٤)$$

که در آن t_w میزان تقاضای سفر زوج سفر w است. الرت و همکارانش H_w را برابر با Z_w در مدل چانگ قرار دادند و مدل وی را بازنویسی کردند [Ehlert, Bell,and Grosso, 2006] .

در چند سال اخیر شبکه‌های بیزین برای به‌دست آوردن تعداد و مکان‌های بهینه شمارش ترافیک مورد توجه قرار گرفته‌است. روش استنباط بیزی در بسیاری از مسائل برنامه ریزی حمل و نقل بکار گرفته شده است هنگامی که تصورات و باورهای قبلی با مشاهدات ترکیب می‌شوند تا بتوانند باورهای جدید را تولید کنند [Sharminda and Krishna, 2011]. روش استنباط بیزی از جمله معروفترین دسته رویکردهای آماری است. در این روشها نیز توزیعهای پارامتری در نظر گرفته می شوند، با این فرض که پارامترها نیز خودشان متغیرهای تصادفی هستند.

ماهر [Maher, 1983] یک توزیع نرمال چند متغیره را با یک نرمال چند متغیره پیشین ترکیب نمود و نرمال تصادفی را برای خطای در مشاهدات در نظر گرفت. تبالدی و وست [Tebaldi and West,1998] توزیع پوآسون را برای جریانها (جریان لینکها و جریان مبدا-مقصد ها) در نظر گرفتند. این رویکرد از جمله رویکردهایی است که در کاربردهای عملی به صورت گسترده ای از آنها استفاده شده (به عنوان مثال ببینید، کستیلو و کجیرولف [Castillo and Kjaerulff, 2003]، جنسن [Jensen, 2001] و چونگ وی و یاسو آساکورا [Chong and Yasuo , 2013]).

کستیلو به کمک همکارانش در سال ۲۰۰۸ با ارائه‌ی دو مقاله [Castillo, Menendez and Sanchez, 2008] و [Castillo, Menendez and Sanchez, 2008] بر اساس کارهای قبلی خود شبکه‌ی گوسین – بیزین[۷] را تعریف نمود. یک شبکه بیزی ترکیبی از احتمالات شرطی و آوردن این احتمالات در ساختار یک گراف می باشد. این محققان الگوریتم ابتکاری خود را برای یک شبکه‌ی کوچک و همچنین شبکه متوسط شهر رئال سیداد[۸] با ۳۸۰ زوج سفر و ۲۱۹ کمان اجرا کردند. به اذعان این پژوهشگران مکانیابی و تخمین ماتریس تقاضای سفر با استفاده از استنباط بیزی، به ساعت‌ها زمان نیاز داشته و استفاده از آن برای بکارگیری در شبکه های بزرگ اگر امکانپذیر نباشد، بسیار مشکل است.

قابل ذکر است که مساله مکانیابی شمارشگرها بر روی شبکه، با توجه به پیشرفتهای بوجود آمده در عرصه تکنولوژی سیستمهای هوشمند حمل و نقل[۹]، و ابزارهای متفاوت اندازه گیری و مشاهده، فرمول بندی جدیدی پیدا کرده است. به عنوان نمونه در سالهای اخیر، کستیلو و همکاران [Castillo et al., 2010] و مینگز و همکاران [Minguez et al. 2010] از تکنیکهای ثبت پلاک و تشخیص خودکار خودرو برای مکانیابی شمارشگرها بر روی شبکه استفاده کرده اند

۲. مدل پایه و روش پیشنهادی

در این قسمت ابتدا به تشریح مدل پایه که همان روش کستیلو و همکارانش [Castillo, Menendez and Sanchez, 2008] جهت شناسایی کمان‌های بهینه شمارش حجم جریان پرداخته

شده‌است. ایده اصلی این محققان استفاده از شبکه‌ی گوسین – بیزین برای بازتولید جریان‌های ترافیکی از روی بعضی جریان‌های ترافیکی مشاهده شده در شبکه بود.

شبکه بیزی یک زوج (G,P) است که در آن G یک گراف جهت‌دار بدون حلقه است که بر روی یک مجموعه از گره‌ها X (متغیرهای تصادفی) تعریف می‌شود، $P = \{p(x_1|\pi_1), \dots, p(x_n|\pi_n)\}$ یک مجموعه n تایی چگالی احتمال شرطی است که برای تمام گره‌های شبکه بیزی تعریف شده، و π_i مجموعه والدین گره x_i در گراف G است.گراف G تمام اطلاعات کیفی درباره روابط میان متغیرها را نشان می‌دهد و به طور مکمل، احتمالات مجموعه P، اطلاعات کمی بین این متغیرها را شامل می‌شوند، به عبارت دیگر مجموعه P ویژگی‌های کیفی ظاهر شده توسط ساختار گرافیکی G را بصورت کمی در می‌آورد. در مسائل حمل و نقل، گره‌های گراف می‌توانند شامل جریان‌های مبدا–مقصد، جریان‌های کمان و دیگر متغیرهای تصادفی مرتبط با این متغیر ها باشند. جهت در کمان‌های گراف شبکه بیزی وابستگی‌های موضعی میان متغیرها را نشان می‌دهد که باید یک جهت داشته باشند. یعنی، گراف G باید یک گراف جهت‌دار باشد. جهت‌های پیکان بین دو گره باید از گره علت یا پدر به سمت گره دیگر که معلول یا پسر است باشد. علاوه بر این، گراف باید بدون حلقه بوده، یعنی، وابستگی‌های بین متغیرها نمی‌تواند چرخه‌ای باشد. یک ویژگی مهم شبکه‌های بیزی که در مدلهای حمل ونقلی از آن استفاده شده است، استخراج ارتباط بین جریان کمانها و مبدا–مقصدها به گونه ای مستقیم از گراف G است.دیگر ویژگی مهم شبکه‌های بیزی از دیدگاه مدلهای حمل و نقلی، درنظر گرفتن خطاهای تاثیرگذار به صورت گره‌های اضافی در شبکه‌های بیزی است.

شبکه‌های بیزی ابزار قدرتمندی هستند که می‌توانند بسادگی در پیش بینی جریان‌های ترافیکی مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، به کمک شبکه بیزی، جریان کمانها و مبدا–مقصدها می‌توانند به کمک توپولوژی شبکه و مشاهده زیرمجموعه‌ای از جریانهای ترافیکی پیش‌بینی شوند. به طور خاص، به کمک ماتریس واریانس– کوواریانس بین جریان کمانها و مبدا–مقصدها، اثر مقدار اطلاعات حاصل از مشاهده برخی از جریان کمانها بر روی بقیه جریانهای شبکه قابل اندازه گیری است.

برای مثال شبکه حمل ونقلی فرضی شکل (۱) را در نظر بگیرید که شامل ٤ گره و ٥ کمان است. در این شبکه حمل و نقل دو زوج مبدا–مقصد $T_1 = (1,4)$ و $T_2 = (2,4)$ وجود دارد. جریان ترافیک از مبدا (۱) با استفاده از دو مسیر $\{d\}$ و $\{a,c\}$ به مقصد (٤) در جریان است. همچنین جریان ترافیک از مبدا (۲) با استفاده از دو مسیر $\{e\}$ و $\{b,c\}$ به مقصد (٤) می رسد. شبکه بیزی برای این مثال در شکل (۲) رسم شده است. لازم به ذکر است اگر کمانی حداقل درون یکی از مسیرهای یک زوج مبدا–مقصد قرار داشته باشد، جریان این زوج مبدا–مقصد به عنوان والد حجم جریان آن کمان در نظر گرفته می شود.

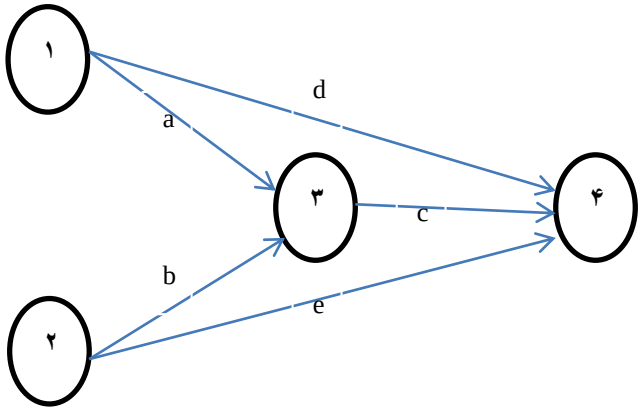
مدل کاستیلو و همکاران با استفاده از شبکه‌های بیزی و بر پایه فروض زیر استوار است:

فرض ۱: بردار T جریان زوج مبدأ– مقصدها یک بردار متغیر تصادفی نرمال $N(\mu_T, \sum_T)$ چندمتغیره با مقدار متوسط μ_T و ماتریس واریانس– کواریانس $\sum_T$ است.

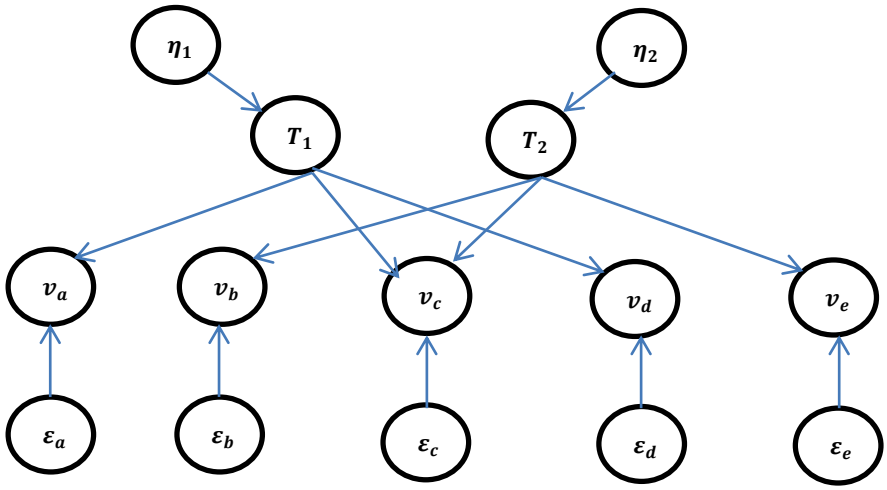
واضح است که متغیرهای تصادفی T (حجم جریان زوج مبدأ– مقصدهای شبکه) همبستگی دارند، به ویژه در اوایل و اواخر تعطیلات، حجم ترافیک همه‌ی زوج مبدأ– مقصدها افزایش پیدا کرده و همچنین با شرایط بد آب و هوایی حجم ترافیک شبکه در همه‌ی زوج مبدأ– مقصدها کاهش پیدا می‌کند. برای مشخص کردن این همبستگی و به‌دست آوردن ماتریس واریانس– کواریانس روابط زوج مبدأ– مقصدها و کمان‌ها به صورت زیر فرض می‌گردد:

$$T = KU + \eta \qquad (۵)$$

در این‌جا K یک ماتریس ستونی با مؤلفه‌های K_i است که وزن نسبی حجم جریان زوج مبدأ– مقصد i را نسبت به کل حجم جریان شبکه اندازه می‌گیرد. به عبارت دیگر اهمیت زوج مبدأ– مقصد i را در شبکه‌ی حمل‌ونقل نشان می‌دهد. همچنین، U یک متغیر تصادفی مثبت است که سطح جریان متوسط کل شبکه را اندازه می‌گیرد.



شکل ۱. شبکه ترافیکی فرضی برای نشان دادن شبکه بیزی متناظر



شکل ۲. شبکه بیزی متناظر شبکه ترافیکی شکل (۱)

به این معنی که زمانی که سطح جریان کل شبکه در تعطیلات آخر هفته، روزهای کاری و ابتدا و انتهای تعطیلات عمومی تغییر می‌کند، می‌توان با این متغیر این تغییرات را در مدل درنظر گرفت. در نهایت η بردار متغیرهای تصادفی مستقل با مقدار متوسط صفر است که مؤلفه‌های آن تغییرپذیری جریان زوج مبدأ– مقصدها را نسبت به مقدار میانگین آن‌ها اندازه می‌گیرد. در نظر گرفتن رابطه (۵) به دلیل این‌که کاهش یا افزایش حجم جریان کل شبکه (مقدار U) بر روی جریان همه‌ی زوج مبدأ– مقصدها تأثیر می‌گذارد، منطقی به نظر می‌رسد و این تأثیر می‌تواند به صورت نسبی فرض شود و متغیر تصادفی η_i تغییرات تصادفی حجم جریان زوج سفر i را در نظر می‌گیرد. قابل توجه است که با مقدار U داده شده، حجم جریان زوج مبدأ– مقصدها مستقل خواهند بود، که البته منطقی به نظر می‌رسد چون، اگر متغیرهای η_i صفر باشند، هنگامی که U داده شده باشد، دیگر استقلال بین حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها پیدا نمی‌کند و اگر η_i ها متغیرهای تصادفی غیرصفر باشند، حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها در شبکه مستقل

خواهند بود زیرا η_i ها مستقل هستند. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده بردار T را می‌توان از رابطه‌ی (٦) تعیین نمود:

$$T = (K\ I)\left(\frac{U}{\eta^T}\right) \qquad (٦)$$

و ماتریس واریانس– کواریانس بردار T یعنی $\sum_T$ از رابطه‌ی (٧) به دست می‌آید.

$$\sum_T = (K\ I)\sum_{(U,\eta)}\left(\frac{K^T}{I}\right) = \sigma_U^2 K\,K^T + D_\eta \qquad (٧)$$

که در آن ماتریس‌های $\sum_{(U,\eta)}$ و D_η ماتریس‌هایی قطری هستند.

فرض ۲: توزیع تصادفی شرطی جریان هر کمان v_a با فرض جریان زوج مبدأ– مقصدهای موجود (T) از توزیع نرمال زیر پیروی می‌کند:

$$v_a \mid T \sim N[\mu_a + \sum_{i\in\Pi_a}\beta_{ai}(t_i - \mu_{t_i}), \psi_a^2] \qquad (٨)$$

در این رابطه ψ_a^2 مقدار واریانس v_a و β_{ai} ضریب رگرسیون v_a و T می باشد که از رابطه‌ی (٩) محاسبه می گردد. Π_a مجموعه زوج مبدا–مقصدهایی که سهمی از جریان آنها از کمان a عبور می کنند. همچنین امید ریاضی متغیر تصادفی v_a از رابطه‌ی (١٠) به‌دست می آید.

$$\beta_{ai} = \sum_k p_{ik}\delta_{ak}^i \qquad (٩)$$

$$E[v_a] = \mu_a = \sum_i \beta_{ai}\,\mu_{t_i} \qquad (١٠)$$

در روابط (٩) و (١٠)، p_{ik} نسبت تقاضای سفر زوج مبدأ– مقصد i است که از مسیر k می‌گذرند، δ_{ak}^i متغیر صفر و یک است. اگر کمان a در مسیر k ام زوج مبدأ– مقصد i باشد این متغیر مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. همچنین t_i و v_a به ترتیب حجم جریان زوج مبدأ– مقصد i و کمان a می‌باشند.

کستیلو و همکاران حجم جریان کمان‌ها را از رابطه زیر محاسبه می‌کنند:

$$V = \beta T + \varepsilon \qquad (١١)$$

که درآن $\varepsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$ یک بردار از متغیرهای تصادفی نرمال با مولفه های دو به دو مستقل هستند که ϵ_i دارای میانگین $E(\epsilon_i)$ و واریانس ψ_i^2 هستند. ϵ_a نشاندهنده حجم جریان عبوری از کمان a ام جدای از جریانهایی است که از مبداها به سمت مقصدهای شبکه جریان دارد، است. همچنین می تواند نشاندهنده خطاهای اندازه گیری حجم بر روی کمان های شبکه باشد که البته در مواردی خاص می توان آنها را صفر فرض نمود.

با توجه به مطالب فوق می‌توان روابط (١٢) تا (١٤) را نوشت:

$$\binom{T}{V} = \left(\frac{I}{\beta}\middle|\frac{0}{I}\right)\binom{T}{\varepsilon} \qquad (١٢)$$

که مقدار متوسط $E(T,V)$ به صورت زیر است:

$$E[(T,V)] = \left(\frac{E}{E}\frac{(U)}{(U)}\middle|\frac{E}{\beta}\frac{(U)}{K}\middle|\frac{K}{+E}\frac{}{(\varepsilon)}\right) \qquad (١٣)$$

و در نهایت ماتریس واریانس– کواریانس (T,V) یعنی $\sum_{(T,V)}$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{(T,V)} = \left(\frac{\sum_T}{\beta\ \sum_T}\middle|\frac{\sum_T\beta^T}{\beta\ \sum_T\beta^T + D_\varepsilon}\right) \qquad (١٤)$$

از روابط (٧) و (١٤) می‌توان مجموعه روابط (١٥) را نوشت:

$$\sum_{TT} = \sigma_U{}^2 K\,K^T + D_\eta \qquad (١٥)$$
$$\sum_{TV} = \sum_{TT}\beta^T$$
$$\sum_{VT} = \sum_{TV}$$
$$\sum_{VV} = \beta\sum_{TT}\beta^T + D_\varepsilon$$

به طور کلی اگر Y و Z دو بردار از متغیرهای تصادفی باشند، آن‌گاه روابط زیر را از قضایای شرطی بیزین برای آن‌ها می‌توان نوشت:

$$\mu_{Y|\,Z=z} = \mu_Y + \sum_{YZ}\sum_{ZZ}^{-1}(z - \mu_z) \qquad (١٦)$$

$$\sum_{Y|Z=z} = \sum_{YY} - \sum_{YZ}\sum_{ZZ}^{-1}\sum_{ZY}$$

$$\sum_{Z|Z=z} = 0$$

حال اگر در مجموعه روابط (١٦) ، Y را بردار حجم جریان زوج مبدأ–مقصدهای شبکه، یعنی T در نظر بگیریم و Z را بردار حجم جریان در کمان‌هایی از شبکه در نظر بگیریم که حجم آن‌ها شمارش شده‌اند(V) آن‌گاه مجموعه روابط (١٧) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mu_{T|\,V=v} = \mu_T + \sum_{TV}\sum_{VV}^{-1}(V - \mu_v) \qquad (١٧)$$

$$\sum_{T|V=v} = \sum_{TT} - \sum_{TV}\sum_{VV}^{-1}\sum_{VT}$$

$$\sum_{V|V=v} = 0$$

۳-۱ الگوریتم کستیلو برای شناسایی کمان-های بهینه جهت شمارش حجم جریان آن‌ها

در این بخش، الگوریتم کستیلو و همکارانش برای شناسایی کمان‌های بهینه جهت شمارش حجم جریان آن‌ها به صورت گام به گام آورده شده‌است [Castillo, Menendez, and Sanchez, 2008].

داده‌های ورودی الگوریتم: ۱- ماتریس مبدأ-مقصدی که معمولاً از قبل موجود است، ۲- مقدار واریانس حجم جریان زوج مبدأ-مقصدها که می‌خواهیم به آن دست یابیم و به عنوان شرط توقف به کار گرفته می‌شود، به این صورت که هرچه این مقدار کمتر باشد تعداد بیشتری کمان برای شمارش انتخاب می‌گردد. ۳- مقادیر K، σ_U، D_η، D_ε و ماتریس β.

خروجی الگوریتم: حجم جریان کمان‌های شمارش‌شده در شبکه

گام ۱) محاسبه ماتریس‌های واریانس-کواریانس: ماتریس‌های واریانس- کواریانس اولیه و Σ_{VV}، Σ_{TV} (Σ_{TT}) به کمک معادلات ۳-۱۱ محاسبه می‌گردند.

گام ۲) محاسبه ضرایب همبستگی: ماتریس ضرایب همبستگی ρ با مؤلفه‌های ρ_{TV} به کمک ماتریس‌های واریانس- کواریانس به دست آمده از معادلات (۱۵) محاسبه می‌گردند.

گام ۳) انتخاب کمان بهینه برای شمارش حجم آن: بزرگترین ضریب همبستگی در ماتریس همبستگی، کمان بهینه جهت شمارش را نشان می‌دهد. به این صورت که این مؤلفه مربوط به هرکدام از کمان‌ها باشد، آن کمان، کمان بهینه خواهد بود و انتخاب می‌گردد.

گام ٤) بهنگام سازی: ماتریس واریانس- کواریانس Σ_{TT} با استفاده از معادله دوم روابط (۱۷) بهنگام می‌گردد.

گام ۵) شرط توقف: در این مرحله واریانس از پیش تعیین شده‌ی حجم جریان زوج مبدأ-مقصدها که آستانه‌ی توقف و تعیین‌کننده‌ی تعداد کمان‌های انتخاب شده جهت شمارش حجم جریان است با واریانس به دست آمده (قطر ماتریس Σ_{TT}) مقایسه می‌گردد و در صورتی که واریانس همگی متغیرهای به دست آمده از مقدار آستانه آن‌ها کمتر باشد الگوریتم پایان یافته تلقی می‌گردد، و در غیر این صورت از گام ۱ عملیات ادامه می‌یابد.

لازم به ذکر است که در هر تکرار برای محاسبه‌ی ماتریس ضرایب همبستگی به کمک ماتریس‌های واریانس- کواریانس، متغیرهایی که واریانس آن‌ها کمتر از مقدار واریانس آستانه‌ی توقف باشد، حذف می‌گردد.

کستیلو و همکارانش الگوریتم پیشنهادی خود را به صورت گام به گام بر روی یک شبکه کوچک نگوین-دپیس اجرا کردند. همچنین این پژوهشگران الگوریتم خود را برای شبکه‌ی حمل‌ونقلی شهر رئال سیداد با ۳۸۰ زوج مبدأ-مقصد و ۲۱۹ کمان به کار بردند که بنا بر اذعان ایشان حل این مسئله بسیار زمانبر بوده است[Castillo, Menendez, and Sanchez, 2008].

۳-۲ اشکالات الگوریتم کستیلو

از آن‌جایی که با افزایش تعداد کمان‌ها و همچنین زوج مبدأ-مقصدهای شبکه، به‌دست آوردن ماتریس‌های واریانس- کواریانس و همچنین ماتریس ضرایب همبستگی بین حجم جریان زوج مبدأ-مقصدها و کمان‌ها در شبکه عملاً غیر ممکن خواهد بود، به‌کارگیری مدل کستیلو و همکارانش برای شبکه‌های بزرگ نامناسب است. به عنوان مثال ماتریس Σ_{TT} برای شبکه‌ی حمل‌ونقل کلان شهر اصفهان با حدود ۱۰۰۰۰۰ زوج مبدا-مقصد، ماتریسی در ابعاد ۱۰۰۰۰۰x۱۰۰۰۰۰ خواهد بود که با توجه به سرعت محاسبه و میزان حافظه فعال رایانه‌های معمول موجود، عملیات محاسبه چنین ماتریسی بسیار زمانبر خواهد بود.

همچنین اشکال دیگر روش کستیلو و همکارانش نحوه‌ی انتخاب کمان بهینه برای شمارش در هر مرحله از الگوریتم است. روش آن‌ها سعی در انتخاب کمانی دارد که بیشترین ضریب همبستگی را بین یک کمان و یک زوج مبدا-مقصد در ماتریس همبستگی دارا باشد. حال آن‌که باید به دنبال انتخاب کمانی برای شمارش بود که اطلاعاتی را که درباره مجموعه زوج مبدأ-مقصدها به دست می‌دهد زیاد باشد. به صورت دیگر اگر یکی از کمان‌ها، کمان بسیار با اهمیتی باشد و اطلاعاتی از تعداد زیادی زوج مبدا-مقصد را داشته باشد، ولی کمان دیگری تنها از یکی از زوج مبدأ-

مقصدها به مقدار زیادی اطلاعات داشته باشد، الگوریتم کستیلو کمان دوم را جهت شمارش انتخاب می‌کند، که منطقی به نظر نمی‌رسد.

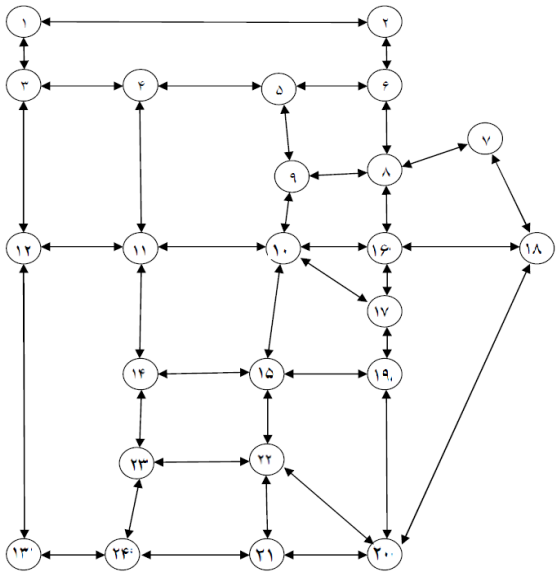
۳-۳ نوآوری های پژوهش

با توجه به این موضوع که هدف این پژوهش، اصلاح الگوریتم کستیلو و همکاران به گونه‌ای که از آن بتوان در انتخاب کمان‌های بهینه برای شمارش در شبکه های حمل‌ونقل شهری بزرگی همچون شبکه‌ی حمل‌ونقل شهر اصفهان استفاده نمود می باشد، سه سؤال به صورت زیر مطرح و به آنها پاسخ داده می‌شود.

سؤال اول: چه باید کرد که تعداد کمان کمتری برای شمارش لازم باشد، تا با استفاده از اطلاعات آن‌ها واریانس جریان‌های زوج مبدأ-مقصدهای شبکه تا حد انتظار کاهش یابد.

سؤال دوم: چه راهکارهایی برای کاهش زمان حل الگوریتم کستیلو می‌توان انجام داد تا بتوان از آن برای تعیین کمان‌های بهینه برای شمارش در شبکه‌های بزرگ استفاده نمود.

سؤال سوم: چه شاخصی برای انتخاب کمان بهینه برای شمارش در گام سوم الگوریتم کستیلو به کار گرفته شود.



شکل ۳. شبکه سایکس-فالز

برای پاسخ به سه سؤال بالا، آزمایش هایی بر روی شبکه خیابانی سایکس-فالز (شکل۳) که به عنوان شبکه‌ای آزمایشی با ابعاد متوسط در بسیاری از پژوهش‌های حمل‌ونقلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام گرفت. شبکه سایکس-فالز ، شبکه‌ای است با ۲٤ گره و ۷٦ کمان که جمعاً ۵۷٦ زوج مبدا-مقصد دارد.

با اجرای الگوریتم کستیلو و همکاران بر روی شبکه خیابانی سایکس-فالز با ماتریس‌های تقاضای سفر اولیه مختلف، پاسخ (نتیجه) زیر برای سؤال اول به دست آمد:

"هرچه تعداد مجهولات در ماتریس‌های D_ε و D_η بیشتر بوده و اندازه مؤلفه‌های این ماتریس بزرگتر باشند، به تعداد بیشتری کمان برای شمارش حجم آن‌ها نیاز است و ناپایداری در رسیدن به جواب در الگوریتم کستیلو ایجاد می‌گردد."

نتیجه بالا به نظر منطقی است، چون اگر D_ε ، D_η و... مجهولات مسئله باشند، حجم کمان‌های شمارش شده به عنوان معلومات مسئله به حساب می‌آید. تعداد مؤلفه‌های D_η در شبکه سایکس-فالز (۵۷٦*۵۷٦) است و تعداد مؤلفه‌های D_ε در این شبکه (۷٦*۷٦) است، و این در حالی است که تعداد ۷٦ کمان در شبکه سایکس-فالز موجود است. به همین دلیل است که کستیلو و همکارانش با انجام فروض معقول تا آن‌جا که توانستند از مجهولات مسئله به صورت زیر کاستند.

الف- D_η که قسمتی از ماتریس واریانس-کواریانس جریان زوج مبدأ-مقصدها است، به صورت ماتریس قطری D_η با مؤلفه‌های یکسان برابر با $(0/1E[t_{ks}] * 0/1E[t_{ks}])$ در نظر گرفته‌شده‌است.

ب- D_ε که قسمتی از ماتریس واریانس-کواریانس حجم جریان کمان‌های مشاهده شده است، به صورت ماتریس قطری D_ε با مؤلفه‌های یکسان برابر با ۰/۱ در نظر گرفته‌شده‌است.

نتیجه‌ای که از پاسخ اول می‌توان گرفت آن است که ماتریس تقاضای سفر اولیه هرچه به‌روزتر و دقیق‌تر باشد، منابع خطای ایجاد شده در آن هرچه بیشتر مشخص باشد و شمارش حجم کمان‌های انتخاب شده هرچه دقیق‌تر انجام گیرد، نیاز به شمارش تعداد کمان کمتری برای رسیدن به نتیجه مطلوب است.

همان‌طور که بیان گردید اجرای روش کستیلو برای شبکه‌های متوسط ساعت‌ها زمان می‌برد، بنابراین در پاسخ به سؤال دوم، تمرکز بر ارائه‌ی راهکارهایی قرار گرفت که زمان حل الگوریتم کستیلو را برای انتخاب کمان‌هایی از شبکه برای شمارش کاهش دهد.

پس از اجرای متوالی و تمرکز بر روی روش کستیلو برای شناسایی کمان‌های بهینه جهت شمارش حجم جریان در آن‌ها، این نتیجه حاصل شد که دو عامل سبب طولانی شدن زمان حل می‌گردد. یکی به‌هنگام‌سازی ماتریس واریانس– کواریانس حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها و کمان‌ها در هر تکرار الگوریتم، و دیگری انتخاب کمان بهینه از میان کمان‌های شبکه می باشد. یکی از علل اصلی زمان‌بر بودن این روش، بسیار بزرگ بودن ابعاد ماتریس واریانس– کواریانس حجم جریان زوج مبدأ– مقصدها و کمان‌ها ($\sum_{VT}$) که به کمک ماتریس واریانس-کواریانس حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها ($\sum_{TT}$) محاسبه می‌گردد، است. به عنوان مثال برای شبکه‌ی حمل‌ونقلی سایکس-فالز که ۵۷۶ زوج مبدأ– مقصد و ۷۶ کمان دارد، ابعاد ماتریس‌های $\sum_{TT}$ و $\sum_{VT}$ به ترتیب (۵۷۶*۵۷۶) و (۷۶*۵۷۶) است. برای شبکه‌های بزرگ‌تر ابعاد این ماتریس‌های بسیار بزرگ خواهد شد و بنابراین محاسبه آن‌ها با مشکل روبه‌رو شده و بسیار زمان‌بر است. بنابراین انتخاب راهکاری مناسب برای کاهش این حجم محاسبات ضروری است. همچنین برای انتخاب کمان بهینه برای شمارش حجم جریان آن باید شاخص اهمیت را برای تمامی کمان‌های شبکه محاسبه کرد و کمانی که بهترین مقدار شاخص را دارد از میان آن‌ها انتخاب شود. پس از بررسی راهکارهای مختلف و انجام سعی و خطاهای متعدد جهت کاهش زمان حل مسئله، دو راهکار حاصل گردید که در قسمت بعدی تشریح خواهند شد.

۳-۳-۱ راهکار اول: شناسایی کمان‌های غیرمهم و حذف آن‌ها جهت کاهش تعداد کمان‌های مورد مقایسه

شبکه‌های حمل‌ونقل شهری معمولاً حدود چندین هزار خیابان (کمان) دارند. در روش کستیلو و همکارانش انتخاب کمان بهینه از میان خیل عظیم این کمان‌ها بسیار زمان‌بر است، زیرا برای این انتخاب در هر مرحله باید مقدار شاخص اهمیت برای هر کمان به‌طور مجزا محاسبه گردد و آن‌گاه کمانی که بهترین مقدار شاخص را دارد به عنوان کمان بهینه انتخاب شود. در این قسمت سعی بر آن است که کمان‌هایی از شبکه در همان اول از مجموعه مقایسه حذف شود. سؤال اساسی این است که کمان‌های قابل حذف چه خصوصیتی دارند. درباره خصوصیت این کمان‌ها (کمان‌های غیرمهم) پژوهشی به صورت زیر بر روی شبکه‌ی سایکس–فالز انجام گردید:

۱۰۰ ماتریس تقاضای مبدأ–مقصد تصادفی را به شبکه سایکس–فالز تخصیص داده و آن‌گاه الگوریتم کستیلو برای شناسایی m کمان بهینه برای شمارش بر روی شبکه مذکور اجرا شد و در نهایت بردار حجم جریان کمان‌های شبکه و همچنین کمان‌های انتخاب شده برای شمارش در جایی ذخیره گردید. نتایج این عملیات در جدول(۱) آورده شده‌است. اگر محتویات جدول (۱) ماتریس X نامیده شود، ستون‌های X دهک‌هایی بر اساس حجم جریان کمان‌های شبکه می‌باشد، به این صورت که شلوغ‌ترین کمان‌ها در دهک دهم و کمان‌های تا ۱۰ درصد حجم بیشینه در دهک اول قرار گرفته‌اند، و سطرهای ماتریس X تعداد کمان‌های انتخابی جهت شمارش می‌باشد، به این مفهوم که سطر اول به معنای انتخاب تنها یک کمان برای شمارش، و سطر i ام به معنای انتخاب i کمان برای شمارش است. X_{in} نشان‌دهنده‌ی درصد انتخاب یک کمان در دهک n ام شلوغی است، هنگامی که هدف انتخاب i کمان برای شمارش است. همان‌طور که دیده می‌شود تعدادی از مؤلفه‌های این ماتریس صفر شده‌اند که این کمان‌ها عموماً کمان‌های کم‌حجم می‌باشد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که امکان انتخاب شدن کمان‌های با حجم کم جهت شمارش بسیار پایین است، به صورتی که می‌توان هنگام اجرای الگوریتم کستیلو، از همان ابتدا از آن‌ها صرف نظر نمود.

نتیجه‌ی دیگری که می‌توان از نتایج به‌دست آمده در این جدول گرفت آن است که هرچه تعداد کمان‌هایی که برای شمارش باید انتخاب شوند کمتر باشد (محدودیت بودجه‌ی شمارش بیشتر باشد)، امکان و احتمال انتخاب کمان‌های با حجم کم، کمتر می‌باشد.

اگر در نتایج ردیف اول و دوم جدول (۱) دقت شود، مشاهده می‌شود که مقادیر سه دهک اولیه صفر است، یعنی هنگامی که هدف انتخاب ۵ کمان از ۷٦ کمان شبکه برای شمارش است، یا به عبارت دیگر هدف شمارش٦ درصد از کمان‌های شبکه باشد، کمان‌هایی با حجم حداکثر ۳۰ درصدکمان با حجم ماکزیمم در شبکه را می‌توان حذف کرد. در شبکه‌های بزرگ معمولاً تعداد کمانی کمتر از ۲ درصد کمان‌های شبکه را شمارش می‌کنند، بنابراین بسیاری از کمان‌های خلوت را می‌توان حذف نمود.

۳-۳-۲ راهکار دوم: کاهش تعداد زوج مبدأ-مقصدهای شبکه

از آنجا که معمولا در مسائل حمل و نقل شهری حل مساله منطقه ای از شهر مورد نظر است، می توان با توجه به موقعیت آن منطقه ماتریس تقاضای سفر را اصلاح و بروزرسانی کرد. در این ارتباط می توان زوج مبدأ-مقصدهایی را که تأثیر کمی بر روی آن منطقه می‌گذارند (حجم جریان کمتری از آن‌ها از منطقه مورد بررسی می‌گذرد)، به عنوان زوج مبدا-مقصدهای کم اهمیت تلقی نمود و در انجام محاسبات از آنها چشم پوشی کرد.

به کمک نتایج بالا می‌توان روش زیر را برای تعیین کمان‌های مهم جهت شمارش پیشنهاد نمود:

"از آن‌جایی که در یک شهر معمولاً وضعیت ترافیکی یک منطقه خاص را مورد بررسی قرار می‌دهند، در ابتدا مقدار جریان مبدأ-مقصدهایی را که اثری بر روی آن منطقه ندارند، حذف کرده و پس از آن ماتریس سفر جدید به کل شبکه تخصیص داده می‌شود و کمان‌های خلوت شناسایی می گردند. این کمانها همان کمانهای غیر مهم می باشند."

۳-۳-۳ ارائه شاخصی مناسب برای انتخاب کمان بهینه برای شمارش

کستیلو و همکارانش در پژوهش خود برای انتخاب کمان بهینه، از ماتریس همبستگی حجم جریان زوج مبدأ-مقصدها و کمان‌ها استفاده کردند. آن‌ها کمانی را که بزرگترین مؤلفه موجود در این ماتریس را داشت به عنوان کمان بهینه برای شمارش حجم جریان، انتخاب نمودند. خصوصیت این کمان آن است که اطلاعات زیادی را برای تصحیح تنها یک زوج مبدا-مقصد به دست می‌دهد. آن‌چه پژوهش حاضر به عنوان شاخصی مناسب برای انتخاب کمان بهینه در یک مرحله پیشنهاد می‌کند، شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدهای شبکه در آن مرحله و مرحله قبل است. در نتیجه کمانی را باید در آن مرحله به عنوان کمان بهینه برای شمارش انتخاب کرد که دانستن حجم جریان آن کمان، بیشترین مقدار شاخص یاد شده را به دست دهد. البته مجموع تفاضل نسبی واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدهای شبکه در آن مرحله و مرحله قبل هم می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب برای انتخاب کمان بهینه به کار رود.

با توجه به این موضوع که شاخص پیشنهادی برای انتخاب کمانهای بهینه برای شمارش، سعی در کمینه کردن شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدهای شبکه در آن مرحله و مرحله قبل دارد، بنابراین بکارگیری این شاخص منطقی به نظر می‌رسد. نویسندگان این مقاله در پژوهشی دیگر کمانهایی را که توسط شاخص پیشنهادی انتخاب کمانهای بهینه برای شمارش انتخاب شده اند را به عنوان ورودی مدل تخمین ماتریس تقاضای سفر به روش بیزی که توسط کستیلو و همکاران ارائه شده، بکار گرفتند. نتایج حاصله، دقت مناسب ماتریس تقاضای سفر تخمین زده شده را نشان داد.

٤. کاربرد مدل پیشنهادی بر روی شبکه حمل و نقل کلان شهر اصفهان

محدوده مطالعه‌یاین پژوهش، محدوده مطالعات جامع حمل‌ونقل اصفهان است که شامل بخش مرکزی شهرستان اصفهان، شهرستان‌های خمینی‌شهر، فلاورجان، مبارکه، بخش‌های مرکزی شهرستان نجف‌آباد و لنجان، دهستان برخوار غربی، بخشی از دهستان برخوار شرقی و میمه بر اساس تقسیمات سیاسی سال ۱۳۷۵ است.

جدول ۱. ماتریس X

۳۱	۳۵	۲۹	۳	۰	۲	۰	۰	۰	۰
۵۶	۵۹	۶۸	۱۰	۲	۵	۰	۰	۰	۰
۸۱	۷۴	۸۷	۱۵	۱۲	۲۱	۱۰	۰	۰	۰
۹۷	۸۶	۱۱۱	۲۳	۲۰	۴۲	۲۱	۰	۰	۰
۸۶	۹۸	۱۲۹	۳۱	۲۴	۶۱	۳۸	۰	۰	۰
۱۱۹	۱۰۶	۱۵۰	۵۱	۲۹	۷۸	۵۰	۳	۰	۰
۱۳۳	۱۱۵	۱۶۶	۵۸	۳۳	۸۷	۷۱	۶	۰	۰
۱۶۴	۱۲۲	۱۷۶	۶۴	۳۵	۱۰۶	۹۶	۸	۱	۰
۱۹۲	۱۲۹	۱۸۸	۷۶	۴۶	۱۲۱	۱۱۹	۱۵	۴	۰
۲۰۶	۱۳۷	۱۹۹	۸۸	۵۵	۱۳۴	۱۵۵	۲۱	۵	۰

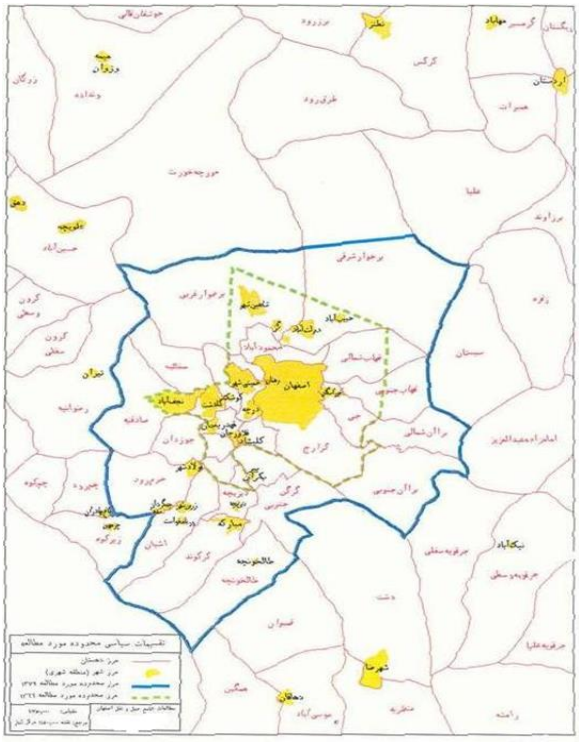
این منطقه با مساحتی حدود ۶۲۱۵ کیلومتر مربع شامل بیش از ۹۰ درصد سفرهای بین شهر اصفهان و دهستان‌های اطراف می شود. مساحت این محدوده، حدود ۶ درصد مساحت استان اصفهان است.شکل (۴) مرز این محدوده را نشان می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه به ۳۱۲ ناحیه ترافیکی تقسیم‌بندی شده است. و این شبکه دارای ۶۶۲۰ گره و ۸۵۲۰ کمان مهم ترافیکی است. نمایی از شبکه‌ی حمل‌ونقلی شهر اصفهان در شکل (۵) آورده شده‌است. در این شکل مرز سیاه رنگ نشان‌دهنده هسته مرکزی شبکه شهر اصفهان است.

۴-۱. اجرای روش ارائه شده و نتایج آن

متداول‌ترین نوع اطلاعات مورد نیاز در فرآیند برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، اطلاعات سفرهایمبدا-مقصد است. این اطلاعات مربوط به سفرهایی است که ارتباط حمل‌ونقلی محدوده مورد مطالعه را در درون محدوده و یا خارج از آن نشان می‌دهد.در مطالعات سفر کلان‌شهر اصفهان، دو گروه سفر قابل تشخیص است. اول سفرهایی که مسافران از یک نقطه به نقطه دیگر انجام می‌دهند، و دوم سفرهایی که جابجایی کالا در آن‌ها صورت می‌گیرد.

وضعیت سفرهای محدوده کلان شهر اصفهان در سال ۱۳۷۹، از آمارگیری سفرهای سفر ساکنان این کلان‌شهر که در آبان ۱۳۷۹ به اجرا در آمد ، به‌دست آمده‌است. این آمارگیری از نوع مصاحبه در منزل بود و از پرسشنامه‌هایی که برای مطالعه سفرهای مبدا-مقصد طراحی شده بود، استفاده شد.



شکل ۴. مرز محدوده مورد مطالعه در سال ۱۳۷۹

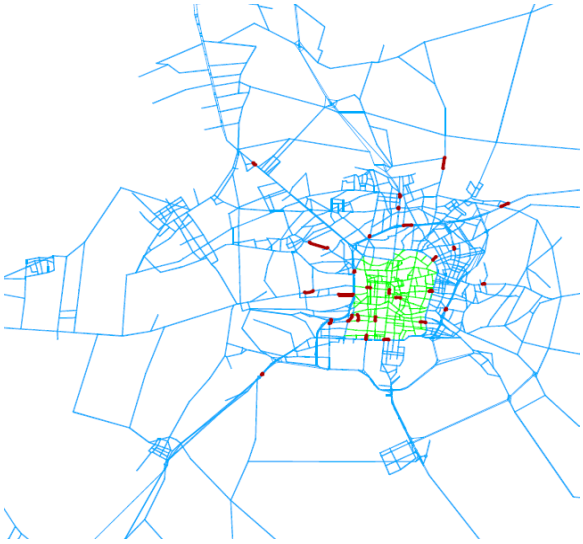
ماتریس تقاضای سفری که به عنوان ماتریس اولیه در این مقاله به‌کار گرفته‌شد همان ماتریسی است که از مطالعات جامع حمل‌ونقل سال ۱۳۷۹ به‌دست‌آمده بود. پس از آن با استفاده از راهکار تشریح شده در قسمت ۳-۳-۱ یعنی شناسایی کمان‌های غیرمهم و حذف آن‌ها تعداد کمان‌های مورد مقایسه کاهش یافت که در نتیجه ابعاد ماتریس‌های واریانس-کواریانس کم شد.

شکل ۵. شبکه خیابانی شهر اصفهان

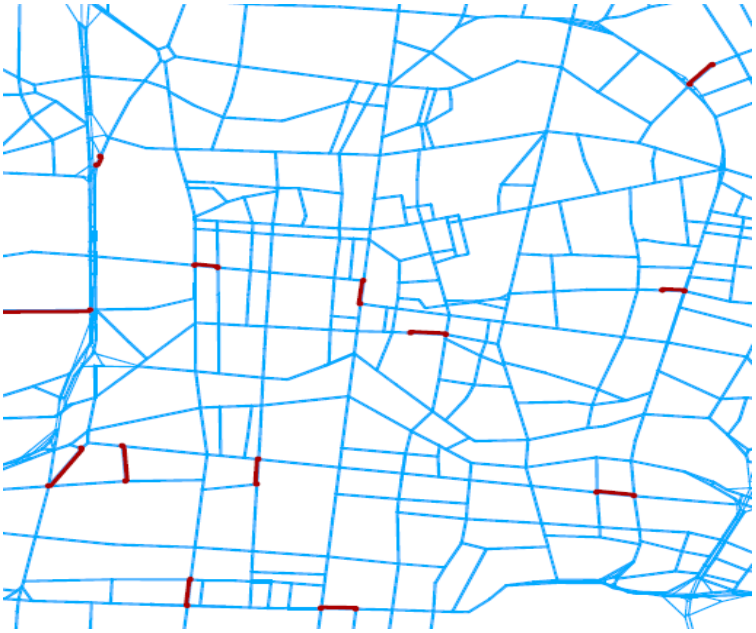
همچنین به جای استفاده از شاخص انتخاب کمان بهینه‌ای که کستیلو و همکارانش در روش خود به کار گرفتند شاخص‌های تشریح شده در قسمت ۳-۳-۳ استفاده گردید. پس از کد کردن این روش در کامپیوتر و استفاده‌ی ترکیبی آن با نرم‌افزار حمل و نقلی EMME/4 ، روش مذکور توسط رایانه‌ای با پردازش‌گر 2.4 GHz اجرا گردید. همانطور که در بالا بیان گردید، در شبکه‌های حمل‌ونقلی شهری بسیاری از اوقات نیازی به مطالعه‌ی کل شبکه نبوده و تنها قسمتی از شبکه وجود دارد. به عنوان مثال اهمیت مطالعه بر روی قسمت‌های مرکزی شبکه‌های شهری بسیار بیشتر از سایر قسمت‌ها است. به همین جهت اصلاح ماتریس تقاضای سفر می‌تواند بر روی بخشی از شبکه صورت گیرد. این مطلب از آن جهت حائز اهمیت است که در بیشتر اوقات تنها اصلاح و به‌روزرسانی ماتریس تقاضای سفر مربوط به هسته‌ی مرکزی شهر مورد نیاز است. برای همین منظور به کمک اجرای ماژول "تخصیص مسیر مبنا[۱۰]" در نرم‌افزار EMME/4استفاده گردید. ماژول "تخصیص مسیرمبنا" از ویرایش سوم نرم افزار EMME به آن اضافه گردیده و قابلیت ذخیره مسیرهای استفاده شده در فرایند تخصیص برای هر مبدا-مقصد را داراست. قابلیت این ماژول ، این توانایی را به ما می دهد که مدل کستیلو و همکارانش را برای شبکه های حمل و نقلی شهری بزرگ، در زمانی قابل قبول عملیاتی کنیم. به کمک این ماژول، مسیرهای استفاده شده توسط زوج مبدأ-مقصدهای شبکه شناساییگردید و امکان حذف زوج مبدأ-مقصدهایی که ازکمان‌های ناحیه‌ی مرکزی شبکه عبور نمی‌کنند، میسر شد.در نهایت روش پیشنهادی در این مقاله برای انتخاب کمان‌های بهینه جهت شمارش برای اصلاح و به‌روزرسانی ماتریس تقاضایسفر هسته مرکزیشهر اجرا گردید. ، که نتایج آن برای هر دو شاخص انتخاب کمان ارائه شده در قسمت ۳-۳-۳ در جدولهای (۲) و (۳) پیوست "الف" آمده است. برای درک بهتر اهمیت کمان‌های انتخاب شده، جایگاه کمان‌های بهینه جهت شمارش برای اصلاح ماتریس تقاضای سفر هسته مرکزی شبکه با شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدها در شکل (٦) آورده شده‌است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود ۱۷ کمان اطراف هسته‌ی مرکزی، کمان‌های بسیار مهمی هستند که بخش‌های اطراف هسته توسط آن‌ها به مرکز شهر متصل می‌شوند. ۱۳ کمان باقیمانده هم در مرکزی‌ترین قسمت شبکه‌ی شهر واقع شده‌اند که همگی از کمان‌های شلوغ شبکه به شمار می‌آیند.برای مشاهده بهتر کمان‌های بهینه جهت شمارشی که در مرکز شبکه واقع شده‌اند این کمان‌ها در شکل (۷) آورده شده‌اند.

۵. بحث و نتیجه گیری

تحلیل جریان ترافیکی در شبکه‌های حمل‌ونقلی نیازمند اطلاعات ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد است. تخمین و یا به‌روزرسانی این ماتریس از طریق روش‌های مستقیم بسیار هزینه‌بر است، بنابراین در سال‌های اخیر روش‌های غیرمستقیم به کار گرفته شده‌است.



شکل ٦. جایگاه کمان‌های بهینه در شبکه برای اصلاح ماتریس تقاضای سفر هسته مرکزی شبکه با شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدها



شکل ۷. جایگاه کمان‌های بهینه در هسته‌ی مرکزی شبکه برای اصلاح ماتریس تقاضای سفر هسته مرکزی با شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدها

یکی از روش‌های غیرمستقیم، تصحیح ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد اولیه به کمک شمارش حجم جریان بعضی از کمان‌های شبکه‌ی حمل‌ونقل است. از آن‌جا که کیفیت تخمین ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد به دقت داده‌های ورودی آن و به ویژه به محل استقرار شمارش کمان‌ها وابسته است، و از طرفی تسهیلات و منابع تخصیص یافته به بخش حمل‌ونقل محدود است، بنابراین

انتخاب مجموعه کمان‌های مناسب که بیشترین اطلاعات را می‌دهد، بسیار اهمیت دارد.تا به امروز تحقیقات زیادی در زمینه‌ی تخمین و به‌روزکردن ماتریس تقاضای مبدأ–مقصد با استفاده از اطلاعات مربوط به شمارش حجم تعدادی از کمان‌های شبکه انجام شده‌است، ولی کمتر بر روی تعیین محل‌های بهینه‌ی شمارش ترافیکی کار انجام گرفته‌است.در سال‌های اخیر شبکه‌های بیزین برای به‌دست‌آوردن کمان‌های بهینه‌ی شمارش ترافیک مورد استفاده قرار گرفته‌است، که در مهم‌ترین آن‌ها کستیلو و همکارانش روشی ارائه کردند که با استفاده از شبکه‌های بیزین جواب‌های خوبی برای شبکه‌های کوچک می‌دهد، ولی به‌کارگیری آن برای شبکه‌های متوسط تا بزرگ بسیار زمان‌بر است.

پس از اجرای متوالی و تمرکز بر روی روش کستیلو برای شناسایی کمان‌های بهینه جهت شمارش حجم جریان در آن‌ها، این نتیجه حاصل شد که دو عامل سبب طولانی شدن زمان حل می‌گردد، که یکی به‌هنگام‌سازی ماتریس واریانس– کواریانس حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها و کمان‌ها در هر تکرار الگوریتم، و دیگری انتخاب کمان بهینه از میان کلیه کمان‌های شبکه است. یکی از علل اصلی زمان‌بر بودن این روش، بسیار بزرگ بودن ابعاد ماتریس واریانس– کواریانس حجم جریان زوج مبدأ– مقصدها و کمان‌ها ($\sum_{VT}$) که به کمک ماتریس واریانس-کواریانس حجم جریان زوج مبدأ–مقصدها ($\sum_{TT}$) محاسبه می‌گردد، است. برای شبکه‌های بزرگ ابعاد این ماتریس‌ها بسیار بزرگ خواهد شد و بنابراین محاسبه‌ی آن‌ها با مشکل روبه‌رو شده و بسیار زمان‌بر است. بنابراین انتخاب راهکاری مناسب برای کاهش این حجم محاسبات ضروری است. همچنین برای انتخاب کمان بهینه برای شمارش حجم جریان آن باید شاخص اهمیت را برای تمامی کمان‌های شبکه محاسبه کرد و کمانی که بهترین مقدار شاخص را دارد از میان آن‌ها انتخاب نمود. پس از بررسی راهکارهای مختلف و انجام سعی و خطاهای متعدد جهت کاهش زمان حل مسئله، دو راهکار برای کاهش زمان حل مسئله حاصل گردید. راهکار اول که به کاهش تعداد کمان‌ها اشاره داشت، بیان می‌کرد که امکان انتخاب شدن کمان‌های با حجم کم جهت شمارش بسیار پایین است، به صورتی که می‌توان هنگام اجرای الگوریتم کستیلو، از همان ابتدا از آن‌ها صرف نظر نمود. به صورت دیگر هرچه تعداد کمان‌هایی که برای شمارش باید انتخاب شوند کمتر باشد (محدودیت بودجه‌ی شمارش بیشتر باشد)، امکان و احتمال انتخاب کمان‌های با حجم کم، کمتر است. راهکار دوم که به کاهش تعداد زوج مبدأ– مقصدها اشاره داشت، بیان می‌کرد که می‌توان با توجه به منطقه‌ای از شهر که می‌بایست اصلاح و به‌روزرسانی ماتریس تقاضای سفر آن صورت گیرد، زوج مبدأ–مقصدهایی را که تأثیر کمی بر روی آن منطقه می‌گذارند (حجم جریان کمتری از آن‌ها از منطقه‌ی مورد بررسی می‌گذرد)، در انجام محاسبات حذف نمود. به بیان دیگر از آن‌جایی که در یک شهر معمولاً وضعیت ترافیکیک منطقه خاص را مورد بررسی قرار می‌دهند، در ابتدا مقدار جریان زوج مبدأ–مقصدهایی را که اثری بر روی آن منطقه ندارند، حذف کرده و پس از آن ماتریس تقاضای مبدأ–مقصد جدید به کل شبکه تخصیص داده می‌شود و کمان‌های خلوت شناسایی می‌گردند.، آنگاه الگوریتم کستیلو را بر روی شبکه اجرا کرده ولی کمان‌های با حجم کم (خلوت) برایافتن کمان‌های بهینه برای شمارش نادیده گرفته می‌شود.

نوآوری دیگر این پژوهش، شاخص انتخاب کمان بهینه از میان کمان‌های مورد مقایسه بود. به این صورت که شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ–مقصدهای شبکه در هر مرحله و مرحله قبل از آن و همچنین شاخص مجموع تفاضل نسبی واریانس‌های زوج مبدأ–مقصدهای شبکه در هر مرحله و مرحله قبل از آن به جای شاخص کستیلو و همکارانش معرفی گردید که منطقی‌تر است.

با استفاده از دو راهکار مطرح شده به راحتی می‌توان تعداد زیادی از زوج مبدأ– مقصدها و همچنین کمان‌هایی که اهمیت کمتری در منطقه‌ی مورد مطالعه دارند را حذف نمود، و در نتیجه به میزان بسیار زیادی در کاهش زمان حل مسئله موفق بود. این روش برای شبکه‌ی حمل‌نقلی کلان‌شهر اصفهان اجرا شد که منجر به انتخاب کمان‌های بهینه برای شمارش گردید.

٦. پی نوشتها

[1] Network sensor Location Problem (NSLP)
[2] Maximum Possible Relative Error (MPRE)
[3] O-D Covering Rule

[٤]Maximal Flow Fraction Rule
[٥]Maximal Flow-Intercepting Rule
[٦]Link Independence Rule
[٧]Gaussian Bayesian Network
[٨]Ciudad Real
[٩]Intelligent Transportation System (ITS)
[١٠]Path base assignment

۷. مراجع

- Berman, O., Bertsimas, D. and Larson, R.C.(1992) "Locating discretionary service facilities, II: maximizing market size, minimizing inconvenience", Operations Research, Vol. 43, pp. 623-632.

- Berman, O., Larson, R. C., and Fouska, N. (1992) "Optimal location of discretionary service facilities", Transportation Science, Vol. 26, pp. 201-211.

- Castillo, E. and Kjaerulff, U. (2003)"Sensitivity analysis in Gaussian Bayesian networks using a symbolic-numerical technique". Reliability Engineering and System Safety Vol. 79, No.2, pp.139–148.

-Castillo, E., Gallego, I., Sanchez-Cambronero, S. and Rivas, A. (2010)"Matrix tools for general observability analysis in traffic networks, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol 11, No.4, pp.799–813.

- Castillo, E., Menendez, J. M. and Sanchez-Cambronero, S. (2008) "Traffic estimation and optimal counting location without path enumeration using Bayesian networks", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 23, pp. 189-207.

- Castillo, E., Menendez, J. M., and Sanchez-Cambronero, S. (2008) "Predicting traffic flow using Bayesian networks", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 42, pp. 482-509.

- Chong, Wei and Yasuo, Asakura (2013) "A Bayesian approach to traffic estimation in stochastic user equilibrium networks", Social and Behavioral Sciences, Vol. 80, pp. 591–607.

- Chung, I. H. (2001) "An optimum sampling framework for estimating trip matrices from day-to-day traffic counts", Ph.D. Thesis, University of Leeds.

- Cipriani, E., Fusco, G., Gori, S. and Petrelli, M. (2006) "Heuristic methods for the optimal location of road traffic monitoring stations", Proceedings of the IEEE-ITS Conference, September 2006, Toronto, Canada.

- Ehlert, A., Bell, M.G.H., and Grosso, S. (2006) "The optimization of traffic count locations in road networks", Transportation Research Part B 40, pp. 460-479.

- Gentili, M. and Mirchandani, P. B. (2012) "Survey of models to locate sensors to estimate traffic flows", Transportation Research Record 2243, pp.108–116.

- Hartley, R. (1928)"Transmission of information", Bell System Technical Journal, Vol. 7, pp. 324-326.

- Hodgson, M. J. (1990) "A flow-capturing location-allocation model", Geographical Analysis, Vol. 22, pp. 270-279.

- Jensen, F.V. (2001)"Bayesian networks and decision graphs, Springer-Verlag.

- Lam, W. and Lo, H. (1990)"Accuracy of OD estimates from traffic counts", Traffic Engineering & Control, Vol. 31, pp. 358-367.

- Larsson, T., Lundgren, J. T. and Peterson, A. (2010)"Allocation of link flow detectors for origin-destination matrix estimation — a comparative study", Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering 25, pp. 116–131.

- Maher, M. J. (1983) "Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach", Transportation Research Part B 17 (6), pp.435–447.

- Minguez, R., Sanchez Cambronero, S., Castillo, E. and Jimenez, P. (2010) "Optimal traffic plate scanning location forod trip matrix and route estimation in roadnetworks". Transportation Research Part B 44 (2), pp.282–298.

- Nyquist, H. (1924)"Certain factors affecting telegraph speed", American Institute of Electrical Engineers, Vol. 43, pp. 412-422.

- Sharminda Bera, K. V. and Krishna, Rao (2011)"Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art", European Transport, n. 49: pp.3-23

- Tebaldi, C. and West, M. (1998)"Inference on network traffic using link count data". Journal of the American Statistical Association 93, pp. 557–576.

- Van Zuylen, H. J. and Willumsen, L. G. (1980)"The most likely trip matrix estimated from traffic counts", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 14, pp. 281-293.

- Viti, F., Rinaldi, M., Corman, F. and Tampere, C. (2014) "Assessing partial observability in network sensorlocationproblems", Transportation Research Part B Vol. 70, pp.65-89.

- Wang, N., Gentili, M. and Mirchandani, P. (2012)"A model to locate sensors for estimating static OD volumes given prior flow information", Transportation Research Record 2283, pp.67-73.

- Yang, H., Iida, Y. and Sasaki, T. (1991)"An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 25, pp. 351-363.

- Yang, H., Yang, C. and Gan, L. (2006)"Models and algorithms for the screen line-based traffic-counting location problems", Computers & Operations Research, Vol. 33, No. 3, pp.836–858.

- Yang, H. and Zhou, J. (1998)"Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 32, pp. 109-126.

- Yim, P. K. N. and Lam, W. H. K. (1998) "Evaluation of count location selection methods for estimation of OD matrices", Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, pp. 376-383.

۱. پیوست الف : کمان‌های بهینه جهت شمارش برای اصلاح ماتریس تقاضای سفر هسته مرکزی شبکه حمل‌ونقلی اصفهان

جدول ۲. کمان‌های بهینه بر اساس شاخص مجموع تفاضل واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدها

	گره مبدأ	گره مقصد	نام کمان
۱	۲۸۳۳	۲۸٤۱	توحید (نظر تا قندی)
۲	۲۸۳٤	٦٤۹٦	میرزاکوچک‌خان (باغ دریاچه تا الفت)
۳	۲٦٤۷	۲٦٤٦	قدوسی (چهارراه ۱۵ خرداد تا شهرز)
٤	۱۰۹۳	۵۱۱	سید علی‌خان (فردوسی تا فتح‌آباد)
۵	۱۰۵۸	۱۰۷۵	چهارباغ عباسی (شیخ‌بهایی تا آمادگاه)
٦	٦۳۹٦	٦۳۰۳	خواجه نظام الملک
۷	۱۲٦۲	۱۲٦۳	شیخ‌بهایی (اردیبهشت تا بهشتی)
۸	۲۸۵٦	۲۸۷٦	حکیم‌نظامی (حسین‌آباد تا ۲۲ بهمن)
۹	۲۳۱٦	۲۳۰٤	پروین (عسگریه تا میخک)
۱۰	۳٦۲٤	۳٦۲۵	چمران (جلوان تا عاشق اصفهانی)
۱۱	۱۷۰۲	۱۷۰۳	کاوه (جابر تا تقاطع)
۱۲	۳۰٤۲	۱۲۱۱	میرزاطاهر (سقاخانه تا سه‌پله)

۱۳	۳٤۰۹	۳٤۰۸	جی (قریشی تا شهدای ابر)
۱٤	۱۷۲۸	۱۷۲۹	امام‌خمینی (عملیات محرم تا دهنو)
۱۵	۱۲۳٦	۱۲۳۷	سه‌راه اشرفی تا ورودی خیام
۱٦	٦۲۱	۳۰۱۵	بهشتی (نبوی تا شهیدان)
۱۷	٤٦۳۳	٤٦۳٤	پل زندان
۱۸	۲۰۰۷	۲۰۱۳	دولت‌آباد (فرزانگان تا شاکری)
۱۹	۳۰۳٦	۳۰۳۷	آتشگاه (نصرآباد تا قدس)
۲۰	۲٤۲۲	۱۰۷۲	بزرگمهر (امامزاده تا هشت‌بهشت)
۲۱	٤۰۰۲	٤۰۰۳	پل شاهین‌شهر آزادگان
۲۲	۵۲۱۱	۵۲۲۳	خامنه‌ای (جمهوری تا اتوبان ذوب‌آهن)
۲۳	٦۱۸۵	۱٤۵۸	پل رباط
۲٤	۲۳۱۱	۲۳۰۷	عسگریه (بیمارستان تا چهارراه عسگریه)
۲۵	۲٦۷۷	۲٦۷٦	سعادت‌آباد (ملاصدرا تا آزادی)
۲٦	۳۷۱۰	۳۷۰۸	بهارستان ورودی جاده شیراز
۲۷	۲٤۸۵	۲٤۷۹	صیادشیرازی (مهرآباد تا علامه‌امینی)
۲۸	۲۸۳۷	۲۸۲٦	وحید (باغ دریاچه تا نظر)
۲۹	۲۸۳۸	۲۸۲۸	خواجه پطروس
۳۰	۱٤۵۱	۱٤۵۲	چمران (۱۵ خرداد تا شهرداری)

جدول ۳. کمان‌های بهینه بر اساس شاخص مجموع تفاضل نسبی واریانس‌های زوج مبدأ-مقصدها

	گره مبدأ	گره مقصد	نام کمان
۱	۲۸۳۳	۲۸٤۱	توحید (نظر تا قندی)
۲	۱۰۷۸	۱۰۹۳	فردوسی (فلسطین تا سیدعلی‌خان)
۳	۲۸۳۰	۲۸۲۹	نظر (حکیم‌نظامی تا نصیری)
٤	۱٤۳۸	۱٤٦۸	پل کاوه
۵	٦۱۸۹	٦۱۰۳	مولوی (اوحدی تا باقوشخانه)
٦	٦۰۰۷	٦۰۱۱	صیادشیرازی (جی تا قدسی)
۷	۱۲۷٦	۲۸۲٤	پل آذر
۸	۲۳۱۱	۲۳۰۷	عسگریه (بیمارستان تا چهارراه عسگریه)
۹	۲۰۲۰	٦۳٦۵	گلستان (آل‌محمد تا ابن‌سینا)

چمران (شهرداری تا پل کاوه)	١٤٥٣	١٤٥٢	١٠
پل فلزی	١٢٧٩	١٢٧٤	١١
پل اکاشوند	٣٦٩١	٣٦٨٤	١٢
سلمان‌فارسی (زمین فوتبال تا بازارچه)	٢٥٠٦	٢٥٠٧	١٣
آمادگاه (باغ‌گلدسته تا فلسطین)	١٠٧٨	٥٠٢	١٤
اشرفی (شهدا تا ابراهیمی)	٣٨٨١	٣٨٨٠	١٥
باغ‌گلدسته (هشت‌بهشت تا نهرفرشادی)	١٠٦١	١٠٥٩	١٦
امام خمینی (خانه اصفهان تا گاز)	٦٣٣٤	١٧٤٥	١٧
دولت‌آباد (فرزانگان تا شاکری)	٢٠١٣	٢٠٠٧	١٨
امام خمینی (رسالت تا آزادگان)	٤٩٨٣	٤٩٨٢	١٩
پل شاهین‌شهر آزادگان	٤٠٠٢	٤٠٠١	٢٠
مشتاق (نوری تا باغ‌کارآن)	١١١٤	١١١٥	٢١
خامنه‌ای (جمهوری تا اتوبان ذوب‌آهن)	٥٢٢٣	٥٢١١	٢٢
پل اندیشه	٢٩١٩	٦٥٨١	٢٣
جاده فولادشهر	٥٤٠١	٥٤٠٤	٢٤
پل رباط	١٤٥٨	٦١٨٥	٢٥
آئینه‌خانه (هفت‌دست تا فردوسی)	٢٦٠٢	٢٦٠٣	٢٦
پل گز	١٦٦٩	١٦٦١	٢٧
سروش (هوشمند تا عسگریه)	٦٣٦٠	٢٣٠٦	٢٨
بزرگمهر (امامزاده تا هشت‌بهشت)	١٠٧٢	٢٤٢٢	٢٩
میرزاطاهر (سقاخانه تا سه‌پله)	١٢١١	٣٠٤٢	٣٠

هادی کریمی، علی ابراهیمی، سید نادر شتاب بوشهری

سید نادر شتاب بوشهری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق را در سال ۱۳٦٤ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سیستمهای اقتصادی- اجتماعی را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۸۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل و نقل، سیستمهای دینامیکی، تحقیق در عملیات و اقتصاد بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی اصفهان است.

هادی کریمی، درجه کارشناسی در رشته ریاضی کاربردی را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سیستمهای اقتصادی-اجتماعی را در سال ۱۳۸٦ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری رشته مهندسی صنایع در دانشگاه صنعتی اصفهان بوده و زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل و نقل، تحقیق در عملیات، تصمیم گیری چندمعیاره و روش‌های بهینه سازی ترکیبی است.

علی ابراهیمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سیستمهای اقتصادی-اجتماعی را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل و نقل، مدیریت استراتژیک و تحقیق در عملیات است.

.۲