

# توسعه مدل بهینه‌سازی هندسی منطقه کارگاهی، جهت کاهش تأثیرات عملیات

## اجرائی بر زمان تأخیر شبکه حمل و نقل

فریدون مقدس‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
مهدی خیرخواه\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mehdi\_Kheirkhah1@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰

### چکیده

با گسترش استفاده از وسایل حمل و نقل، راه‌ها، بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها به سرعت در حال توسعه هستند. پس از سپری شدن عمر مفید روسازی، کارگاه‌های ترمیم روسازی در مسیر ترافیک، استقرار می‌یابند. تراکم ترافیک در مناطق کارگاهی، اثراتی از قبیل افزایش زمان تلف شده استفاده کنندگان از راه، افزایش ریسک تصادفات و افزایش هزینه‌های حمل و نقل را در پی خواهد داشت. این تأخیر شامل تأخیر قبل و در هنگام عبور از منطقه کاری در اثر کاهش سرعت و بعد از خروج از منطقه کاری ناشی از بازگشت به سرعت اولیه، می‌باشد. هدف از این تحقیق، ارزیابی مدلی است که بتواند با طراحی بهینه‌ی طول این کارگاه‌ها و فواصل آنها از یکدیگر، زمان تأخیر ناشی از گلوگاه‌های به وجود آمده در اثر بستن قسمتی از خط عبور جاده را تا آنجا که ممکن است کمینه نماید. پس از کالیبراسیون نرم‌افزار AIMSUN برای شرایط حاکم در جاده‌های ایران، و شبیه‌سازی مناطق عملیاتی در این نرم‌افزار، تأثیر ۷ پارامتر مختلف بر زمان تأخیر، بررسی شد. گروه اول پارامترها شامل: پارامترهای ترافیکی جریان که عبارتند از: دبی جریان و درصد کامیون عبوری، و گروه دوم پارامترها مربوط به هندسه‌ی منطقه عملیاتی شامل تعداد کارگاه‌ها، طول کارگاه‌ها، فاصله‌ی بین کارگاه‌ها، شماره‌ی خط عبوری مسدود شده و نحوه‌ی چینش کارگاه‌ها در منطقه‌ی عملیاتی است. در ادامه بر اساس داده‌های استخراج شده از نرم‌افزار AIMSUN، مدلی جهت بهینه‌کردن زمان تأخیر در مناطق عملیاتی ارائه شده که می‌تواند با دریافت پارامترهای تعداد خطوط عبور، تعداد خطوط مسدود شده، دبی جریان ترافیکی و درصد کامیون عبوری از منطقه عملیاتی، طول و فاصله‌ی بهینه جهت کمینه‌شدن زمان تأخیر را به کاربر ارائه دهد. در پایان مدل ارائه شده با کد نویسی در نرم‌افزار MATLAB به صورت بسته‌ی نرم‌افزاری ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: منطقه عملیاتی، زمان تأخیر، شبیه‌سازی، کالیبراسیون، بهینه‌سازی

### ۱- مقدمه

می‌توان بر مبنای شاخص‌های مختلفی چون طول منطقه عملیاتی، طول صف، زمان تأخیر، تعداد توقف، میزان آلودگی هوا، مصرف سوخت، هزینه‌ی سوخت، هزینه‌ی کاربران، تأثیرات بر رمپ بالادست ... و یا ترکیبی از این موارد بنا نمود. تاکنون مطالعات

در سال‌های اخیر با افزایش نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری راه‌ها، تلاش‌هایی در زمینه‌ی بهینه‌کردن پارامترهایی چون طول منطقه عملیاتی و برنامه‌ی زمان‌بندی اجرای عملیات، برای کاهش هزینه‌ها صورت پذیرفته است. بهینه‌سازی مناطق عملیاتی را

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳

فراوانی در زمینه‌ی بررسی و تحلیل پارامترها و ویژگی‌های مختلف جریان ترافیکی در محدوده‌ی مناطق عملیاتی، صورت پذیرفته است. این پژوهش‌ها بیشتر به بررسی تأثیرات منفی برپایی کارگاه بر پارامترهایی چون سرعت متوسط، تعداد تصادفات، هزینه‌های کاربر، هزینه‌های کل، ظرفیت خطوط عبور و ... می‌پردازند، و گاهی با ارایه‌ی یک مدل ریاضی، سعی در بهینه‌نمودن یک یا چند پارامتر، برای ایجاد جریان روان‌تر، در مناطق عملیاتی دارند. اکثر این پژوهش‌ها در مناطق عملیاتی با تنها یک قطعه مسدود از راه، صورت می‌گیرند و اکثراً از هندسه‌ی این مناطق که حالات گوناگونی را در بر می‌گیرد و می‌تواند بر میانگین سرعت وسایل نقلیه‌ی عبوری، ظرفیت خطوط عبور، زمان سفر و پارامترهای دیگر ترافیکی، به شدت موثر باشد، چشم پوشی می‌شود. طرح هندسه‌ی یک منطقه‌ی عملیاتی - که طرح جانمایی کارگاه‌های آن تا حدود زیادی در دست طراح است - می‌تواند شامل مواردی چون طول کارگاه‌ها، فواصل بین کارگاه‌ها و حالت چینش کارگاه‌ها در عرض و طول جاده، باشد. حالات مختلفی که از ترکیب این پارامترهای هندسی به وجود می‌آید می‌تواند بازه‌ی گسترده‌ای از رفتار رانندگان، زمان سفر، زمان تاخیر، سطوح مختلف ایمنی و ... را به وجود آورد. در این میان زمان تاخیر، هم از نظر کاربران راه و هم از نظر هزینه‌های کل - که شامل میزان مصرف سوخت و آلودگی زیست محیطی نیز می‌شوند - حائز اهمیت است. امروزه شبیه سازی کامپیوتری، در تحقیقات ترافیکی، ابزار تحلیلی مهمی در عرضه‌ی مهندسی ترافیک محسوب می‌شود. این روش‌ها معمولاً بسیار کم هزینه‌تر هستند؛ نتایج به سرعت قابل دسترسی بوده و نتایج تولید شده شامل ضرایب تأثیر<sup>۱</sup> فراوانی هستند که براحتی از مطالعات در محل قابل استخراج نیستند؛ از اختلال در جریان ترافیکی که در مطالعات در محل امری عادی هستند اجتناب می‌کنند؛ بررسی و ارزیابی تأثیر عملی افزایش تقاضا در آینده؛ توسط این روش‌ها مسیر است.

فرض‌هایی که در این تحقیق در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از:

- منطقه عملیاتی در جاده ای با ۲، ۳ یا ۴ خط عبور قرار دارد.
- ظرفیت هر خط عبور با توجه به محدودیت‌های به وجود آمده برای جریان ترافیکی و با توجه به مطالعاتی که در ادامه

به آنها اشاره می‌شود، حداکثر ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت است که علت این امر در قسمت (۵ شبیه سازی) شرح داده شده است.

- جریان حداکثری (ساعت پیک جریان) در طول ساعات روشن روز اتفاق افتاده و بیشتر از یک ساعت به طول نمی‌انجامد. زیرا بازه‌ی شبیه سازی ۱ ساعت در نظر گرفته شده است.

- فاصله بین کارگاه‌ها کمتر از ۵۰۰ متر است، در غیر این صورت کارگاه‌ها مانند مناطق عملیاتی جدا از هم در نظر گرفته می‌شوند. دلیل این امر در قسمت (۵ شبیه سازی) شرح داده شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

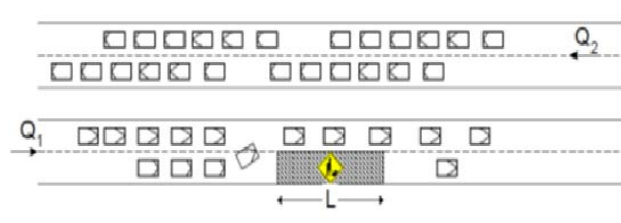
در سال ۱۹۹۱ مجلس کنگره‌ی ملی آمریکا، خواهان آغاز بررسی در زمینه‌ی سیستم‌های هوشمند حمل و نقل (ITS)<sup>۲</sup> شد تا بتوان با توسعه‌ی سیستم‌های مدیریتی پیشرفته‌ی ترافیکی (ATMS)<sup>۳</sup>، به توسعه‌ی توان مدیریتی در کنترل ترافیک پرداخته شود. این اقدام کنگره، سرآغازی بود بر حرکتی فراگیر بسوی استفاده از شبیه‌سازی جریان ترافیکی و مدل کردن ریاضی پارامترهای مختلف جریان همچون زمان سفر، هزینه‌ها، زمان تاخیر، ظرفیت خطوط عبوری، سرعت متوسط جریان و ... که تا به امروز ادامه داشته و رو به فزونی است.

در سال ۱۹۸۰، McCoy برای بهینه‌سازی طول منطقه‌ی عملیاتی، چهارچوبی ارایه نمود. تأکید وی بر حداقل کردن هزینه‌ی تصادفات (از لحاظ ایمنی)، تأخیر کاهش سرعت (از لحاظ کاربران) و هزینه‌ی عملیاتی اضافی و کنترل ترافیک بود (McCoy, ۱۹۸۰).

اما در سال ۱۹۸۷، وی با همکاری Peterson، به این نتیجه رسید که با در نظر گرفتن گروه‌های مختلف کاربران راه، باید طول بهینه را از لحاظ ایمنی تا ۶۰ درصد افزایش داد (Peterson, 1987).

در سال ۱۹۹۶، Xu و Martinelli با بررسی دوباره‌ی مدل McCoy، به این نتیجه رسیدند که در دراز مدت تأخیر ناشی از صف‌بندی در مناطق عملیاتی، تأثیری بر طول بهینه منطقه

حالت مختلف مسدود کردن مسیر جریان ترافیکی را در نظر گرفت؛ حالت اول انسداد کامل مسیر و استفاده از مسیر جایگزین، حالت دوم بستن یک خط عبور بدون در نظر گرفتن مسیر جایگزین، حالت سوم انتقال بخشی از جریان از مسیر جایگزین، حالت چهارم استفاده از یک خط مسیر در جهت مخالف. وی در تحقیق خود تأثیر ۱۴ پارامتر مختلف از جمله طول قسمت‌های مختلف یک کارگاه، مدت زمان برپایی کارگاه، ارزش زمانی، هزینه تصادفات و ... را بررسی کرد و در مدل ارائه شده به کار برد (Schonfeld, 2005).



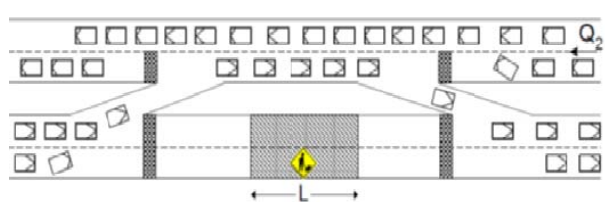
حالت ۲

عملیاتی ندارد. مدل آنان برای یافتن طول بهینه منطقه عملیاتی، بر پایه‌ی محاسبه هزینه کل استوار است (Xu, Martinelli). Kim و همکارانش، بر اساس اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده از آزادراه‌های مریلند، یک مدل رگرسیون خطی بین ظرفیت منطقه عملیاتی و فاکتورهایی چون تعداد خطوط مسدود شده، درصد وسایل نقلیه سنگین، طول منطقه عملیاتی، شیب و شدت عملیات راهداری گسترش دادند (Kim et al, 2004).

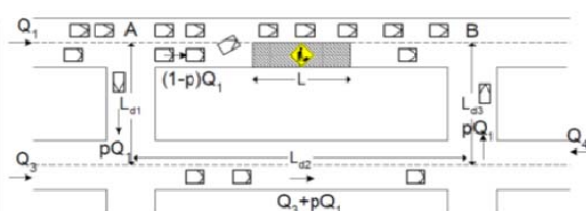
در سال ۲۰۰۵، Schonfeld نتایج کار خود، در خصوص بهینه کردن طول کارگاه منطقه‌ی عملیاتی در حالات مختلف انسداد یک مسیر ۴ خطه‌ی ۲ طرفه را ارائه نمود که تا به امروز یکی از کامل‌ترین مراجع طول بهینه‌ی کارگاهی است. وی ۴



حالت ۱



حالت ۴



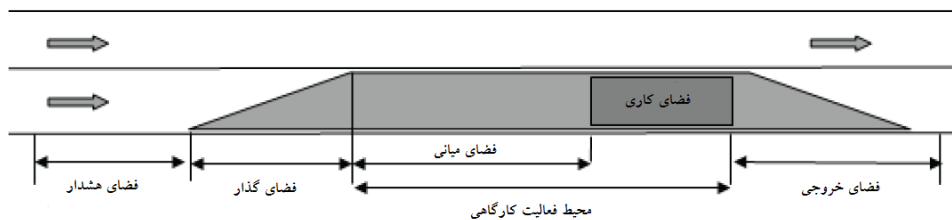
حالت ۳

شکل ۱. حالات متفاوت انسداد مسیر (Schonfeld, 2005)

(2008). با شبیه سازی منطقه‌ی عملیاتی در نرم افزار VISSIM و در نظر گرفتن پارامترهای طول کارگاه، Chitturi و Benekolah، تفاوت سرعت میانگین بین وسایل نقلیه سواری و کامیون، حجم جریان عبوری و درصد کامیون عبوری متوجه شدند با افزایش ۳ پارامتر طول کارگاه، تفاوت سرعت میانگین بین وسایل نقلیه سواری و کامیون، و افزایش حجم جریان عبوری، زمان سفر افزایش می‌یابد که بین این ۳ عامل، پارامتر تفاوت سرعت میانگین بین وسایل نقلیه سواری و کامیون، بیشترین تأثیر را دارا است (Chitturi, Benekolah, 2007).

پس از آن Schonfeld با همکاری Tien با استفاده از یک تابع هیپربولیک و با ثابت در نظر گرفتن حجم ترافیکی و نسبت انحراف ترافیکی، سعی کردند طول منطقه عملیاتی را بر اساس به حداقل رساندن هزینه‌ی تعمیر و نگهداری، بهینه کنند (Schonfeld, Tien, 2006). در همان سال، دو محقق برای تخمین ظرفیت مناطق عملیاتی آزادراه‌ها، نوعی شبکه عصبی به نام شبکه عصبی تابع اساسی شعاعی<sup>۴</sup> را گسترش دادند (Aadeli, Karim, 2006). در سال ۲۰۰۸، Jing و Qian روشی شامل یک الگوریتم تکرار شونده، برای بهینه کردن طول کارگاه در یک مسیر ۲ خطه‌ی ۲ طرفه ارائه دادند (Qian, Jing,

محیط فعالیت کارگاهی است و زمان تلف شده در آن کمتر خواهد بود (Benekolah, Ramezani, 2011).



شکل ۲. تقسیم‌بندی منطقه عملیاتی توسط Benekolah , Ramezani

عبور آن مسدود است. از روی پل در دست ساخت، اقدام به تصویر برداری از ترافیک شد، تا پارامترهای مربوط به رفتار رانندگان در تغییر خطوط و رعایت فواصل ایمنی وسایل نقلیه و سایر پارامترها هرچه دقیق‌تر و نزدیک‌تر به شرایط و ویژگی‌های رانندگان ایرانی کالیبره گردند. برای به دست آوردن برخی پارامترها نظیر سرفاصله نیز، اقدام به تصویر برداری با دوربین با سرعت بالای ضبط تصاویر از جریان ترافیک شد تا با ثبت فاصله‌ی زمانی عبور ۲ خودرو از یک نقطه، سرفاصله‌ی خودروها به دست آید. جهت اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، از یک خودرو نمونه، که این مسیر را سه بار پیموده و سرعت لحظه‌ای آن ثبت می‌گردد استفاده شد. برای آن که نتایج حاصل از اطلاعات برداشت شده توسط خودروی نمونه، با میانگین نسبی پارامترهای ترافیکی، منطبق باشد، خودروی نمونه، به گونه‌ای حرکت می‌کرد که به ازای هر وسیله نقلیه‌ای که از آن سبقت می‌گرفت، از یک وسیله نقلیه‌ی دیگر سبقت بگیرد. نتایج حاصل از خودروی نمونه، جهت اعتبارسنجی نرم افزار، استفاده خواهد شد. این روش برداشت داده‌های میانگین سرعت، در کتاب McShane توصیه شده است. با بازبینی فیلم در بازه‌ی زمانی ۸:۰۰ (حرکت با سرعت زیاد) و ۸:۲۵ (ساعت نزدیک به اوج) و زیر نظر گرفتن رفتار ۵۰ راننده، در هر بازه‌ی زمانی، زمان واکنش رانندگان به طور میانگین، به صورت جدول ۱ برداشت شد. لازم به توضیح است این پارامتر از روی زمانی که

پس از آن Benekolah و همکارش در سال ۲۰۱۱ طول یک کارگاه را به چند قسمت تقسیم کردند؛ آنها بیان کردند کاهش ظرفیت در منطقه‌ی عملیاتی در ۲ قسمت فضای گذار<sup>۶</sup> و فضای کاری<sup>۶</sup> صورت می‌پذیرد. ظرفیت فضای گذار، بیش از

### ۳- کالیبراسیون نرم افزار AIMSUN

پارامترهایی که در مدل‌های خودرو دنبال‌هم (Car Following)، تغییرخط (Lane Changing) و تعیین فاصله (Gap Acceptance) نرم افزار AIMSUN بکار گرفته می‌شوند به صورت پیش فرض مقادیر خاصی دارند که می‌توان آنها را برای منطقه‌ی مورد نظر اصلاح و یا کالیبره<sup>۷</sup> کرد. در دسته بندی مدل به کار رفته در نرم افزار AIMSUN می‌توان این نرم افزار را، شبیه سازی تصادفی، پویا و گسسته که در ۳ سطح میکروسکوپی، مژوسکوپی و ماکروسکوپی توانایی شبیه سازی جریان ترافیکی را دارد، طبقه بندی کرد. ۳ بازه‌ی زمانی برای برداشت داده‌های ترافیکی، در نظر گرفته شد:

- ساعت ۶:۳۰ صبح، به عنوان جریان ترافیکی آزاد (ترافیک کم بوده و سرعت آزاد جریان FFS برقرار است)؛
  - ساعت ۸:۰۰ صبح، به عنوان بازه‌ی زمانی نزدیک به اوج (ترافیک روان بوده اما سرعت رانندگان کمتر از FFS است)؛
  - ساعت ۸:۲۵ صبح، به عنوان بازه‌ی زمانی اوج ترافیک (ترافیک سنگین و حرکت خودروها با توقف‌های زیادی مواجه است).
- محل برداشت داده‌ها قسمتی از بزرگراه فاطمیه است که به علت وجود رمپ، مطالعه‌ی حرکات درهم تنیدگی<sup>۸</sup> میسر است و هر سه حالت جریان ترافیکی، یعنی جریان آزاد، جریان روان و ترافیک سنگین در ساعات خاصی قابل مشاهده است. همچنین به علت ساخت پل منطقه عملیاتی در آن وجود داشته و یک خط

راننده نسبت به تغییر سرعت راننده‌ی جلو، واکنش نشان می‌دهد، به دست می‌آید.

جدول ۱. داده‌های برداشت شده جهت محاسبه زمان عکس‌العمل

زمان عکس‌العمل	
۱/۱۵	بازه‌ی زمانی ساعت ۸:۰۰
۰/۸	بازه‌ی زمانی ساعت ۸:۲۵

زمان عکس‌العمل، برای حجم عبوری کمتر از ۷۵۰ وسیله نقلیه در هر خط عبور در هر ساعت زمان عکس‌العمل ۱/۱۵ ثانیه و برای احجام بزرگ‌تر از آن ۰/۸ ثانیه، به دست آمد. با بررسی اطلاعات برداشت شده در ۲ بازه‌ی زمانی ۸:۰۰ و ۸:۲۵ برای زمان عکس‌العمل در حالت سکون:

جدول ۲. زمان عکس‌العمل در حالت سکون

زمان عکس‌العمل در سکون	
۱/۴ ثانیه	بازه‌ی زمانی ساعت ۸:۰۰
۱/۸ ثانیه	بازه‌ی زمانی ساعت ۸:۲۵

بنابراین زمان عکس‌العمل در حالت سکون برابر ۱/۶ ثانیه خواهد بود.

پارامترهای مختص رفتار رانندگان هنگام سبقت‌گیری عبارتند از: درصد ماندن در خط سبقت، درصد سبقت از راست و درصد تغییر خط بی‌احتیاط. با آنالیز داده‌های برداشت شده و در نظر گرفتن ۱۰۰ وسیله‌ی نقلیه مشخص شد حدوداً ۷۰٪ رانندگان، پس از سبقت گرفتن در خط سبقت باقی می‌مانند و ۴٪ رانندگان از سمت راست سبقت می‌گیرند، در حالی که پیش فرض این عدد در نرم افزار صفر است. همچنین با برداشت داده در بازه‌ی زمانی ۸:۰۰ و در نظر گرفتن رفتار ۵۰ راننده که مبادرت به تغییر خط عبور کرده بودند، مشخص شد تقریباً ۱۵ درصد رانندگان

ایرانی دست به تغییر خط بی‌احتیاط می‌زنند. معیار بی‌احتیاطی در تغییر خط عبور شامل موارد زیر است. استفاده نکردن از چراغ راهنما، تغییر خط عبور بدون توجه به وجود خودروی نزدیک در خط عبور مقصد، تغییر خط ناگهانی، جهت جلوگیری از برخورد با مانعی که در خط عبور فعلی وجود دارد (مانند چاله یا عابر پیاده و یا خودرو).

حداکثر سرعت مجاز در بزرگراه مورد نظر ۱۲۰ کیلومتر در ساعت است که این سرعت جایگزین سرعت ۹۰ کیلومتر در ساعت نرم افزار گردید. پارامتر فواصل منطقه‌ای<sup>۹</sup> بر حرکات درهم تنیدگی جریان ترافیکی و تغییر خط بسیار موثر بوده و باید به دقت بررسی گردند.

با بررسی اطلاعات برداشت شده در ساعت ۶:۳۰ صبح - که به خاطر جریان روان ترافیک، رانندگان می‌توانند به صورت دلخواه اقدام به تغییر خط عبور کنند - و با بررسی رفتار رانندگان هنگام تغییر خط این فواصل بر حسب ثانیه به صورت زیر به دست آمد:

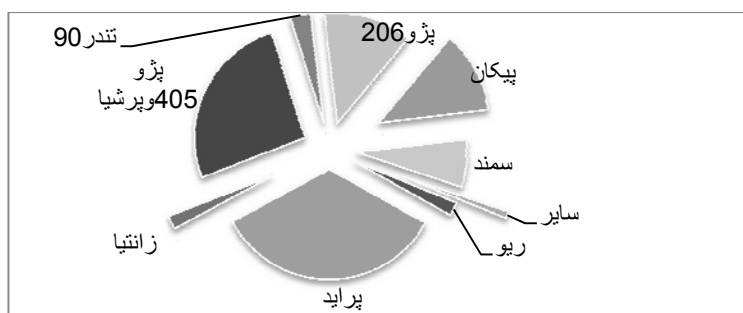
جدول ۳. زمان عکس‌العمل در حالت سکون

زمان به ثانیه	
۸	منطقه ۱
۵	منطقه ۲

خصوصیات وسایل نقلیه شامل ابعاد، شتاب‌ها، رفتار رانندگان، فواصل زمانی سرفاصله‌ها (هدوی‌ها)، رسته‌ی وسیله نقلیه (وسيله نقلیه عمومی یا شخصی)، مصرف سوخت، آلاینده‌ها و ویژگی‌های دیگر مشابه، در مدل‌های نرم افزار AIMSUN در نظر گرفته می‌شوند. برای یافتن ترکیب وسایل نقلیه (درصد هر نوع وسیله نقلیه در جریان ترافیکی)، با مراجعه و استعمال از مرکز شماره‌گذاری پلیس راهور ناجا در رابطه با ترکیب وسایل نقلیه شماره‌گذاری شده در ایران، درصد این وسایل نقلیه مطابق جدول ۴ به دست آمد.

جدول ۴. سهم وسایل نقلیه در ترافیک، با توجه به داده‌های پلیس راهور ناجا

سایر	زانتیا	سمند	ریو	تندر ۹۰	پیکان	پژو ۲۰۶	پژو ۴۰۵ و پرشیا	پراید	درصد سهم
۱	۲	۷	۲	۳	۱۲	۱۳	۲۶	۳۴	



شکل ۳. داده‌های پلیس راهور ناجا از سهم شماره گذاری وسایل نقلیه

حداکثر سرعت دلخواه، حداکثر سرعتی است که هر نوع وسیله نقلیه می‌تواند با این سرعت در هر نقطه از شبکه حرکت نماید. برای برداشت این پارامتر از داده‌های برداشت شده در ساعت ۶:۳۰ صبح (بازه‌ی زمانی رانندگی با سرعت دلخواه) استفاده شد و سرعت‌ها به طور تقریبی برای ۳۰ وسیله نقلیه به صورت زیر به دست آمد.

با توجه به ترکیب جریان ترافیکی وسایل نقلیه و جمع‌آوری داده‌های ابعاد خودروهای ذکر شده در جدول ۴، و با محاسبه‌ی میانگین وزنی، طول میانگین برای خودروها ۴/۲ متر خواهد بود که در داده‌های نرم افزار ثبت گردید. عرض وسایل نقلیه نیز معادل ۱/۸ متر به دست آمد که عرض وسایل نقلیه، در آنالیز نرم‌افزار و داده‌های خروجی بی‌تأثیر بوده و تنها در خروجی تصویری نرم افزار به کار خواهد رفت.

جدول ۵. فراوانی سرعت خودروها

۱۴۰-۱۲۰	۱۲۰-۱۰۰	۱۰۰-۸۰	۸۰-۶۰	سرعت (کیلومتر با ساعت)
۱۲۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	میانگین سرعت
۴	۱۱	۱۰	۵	فراوانی

حداکثر شتاب افزایشی که وسیله‌ی نقلیه می‌تواند به آن برسد با توجه به زمان لازم وسیله نقلیه برای رسیدن به سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، به دست می‌آید. با مراجعه به تارنمای سازندگان خودرو و با توجه به توزیع میانگین وزنی جدول ۶ برابر ۲/۳۸ متر بر مجذور ثانیه بوده که در شبیه سازی مقدار آن برابر ۲/۵ متر بر مجذور ثانیه، در نظر گرفته شد.

$$\frac{5 \times 60 + 10 \times 80 + 11 \times 100 + 4 \times 120}{30} = 89/33$$

حداکثر سرعت دلخواه برابر ۸۹/۳۳ کیلومتر بر ساعت، به دست آمد که در نرم افزار برابر ۸۹ کیلومتر بر ساعت، منظور گردید.

جدول ۶. شتاب افزایشی خودروهای سواری به تفکیک نوع خودرو

زانتیا	سمند	ریو	تندر ۹۰	پیکان	پژو ۲۰۶	پژو ۴۰۵ و پرشیا	پراید	
۴	۱۰	۱	۸	۱	۱۸	۲۵	۲۸	درصد خودرو
۲/۷۸	۲	۲/۵۲	۲/۷۸	۱/۹۰	۲/۸۹	۲/۵۲	۱/۹۱	حداکثر شتاب

برابر ۰/۵۵ متر در نظر گرفته شد. پارامتر حداقل سرفاصله، حداقل فاصله‌ای است که رانندگان در حال حرکت، از خودروی جلویی خود رعایت می‌کنند که آن را به صورت زمانی و بر حسب ثانیه از داده‌های برداشت شده از بازه‌ی زمانی ۸:۰۰ صبح (ترافیک نزدیک به اوج)، برای ۴۰ راننده، برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری این فواصل تصاویر برداشت شده، با دور آهسته مرور شد، و فاصله‌ی زمانی رسیدن ۲ وسیله‌ی نقلیه به یک نقطه‌ی مشخص از راه، ثبت شد.

#### ۴- اعتبار سنجی نتایج حاصل از کالیبراسیون

برای بررسی میزان تأثیر کالیبره کردن پارامترهای مختلف نرم افزار بر خروجی‌ها و بررسی تطابق نتایج مدل‌سازی با واقعیت، می‌توان با مقایسه کردن تفاوت نتایج خروجی نرم افزار در ۲ حالت قبل و بعد از کالیبراسیون با نتایج برداشت شده در محل، به میزان تأثیر و درصد صحت پروسه کالیبراسیون پی برد. بدین منظور ۳ بار مسیر مورد نظر در بازه زمانی ۸:۰۰ صبح طی شد و زمان سفر برای هر بار طی کردن مسیر به طور جداگانه به گونه‌ای ثبت شد که با سبقت گرفتن هر خودروی عبوری از خودروی نمونه، این خودرو نیز از خودروی دیگری سبقت گیرد، تا داده‌های سفر برداشت شده از این خودرو تقریباً برابر میانگین سفر کل خودروهای عبوری از مقطع باشد. روش استفاده شده در کتاب McShane برای برداشت داده‌های میانگین، توصیه شده است.

جدول ۷. محاسبه‌ی میزان پذیرش سرعت

از فراوانی سرعت خودروها

سرعت (کیلومتر بر ساعت)	$\frac{v_1}{v_2}$	$\frac{v_2}{v_3}$	$\frac{v_3}{v_4}$	$\frac{v_4}{v_5}$	جمع
میانگین سرعت	۱۲۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	
تعداد خودرو	۴	۱۱	۱۰	۵	۳۰

حداکثر شتاب کاهشی، حداکثر شتاب ترمز وسیله‌ی نقلیه است که می‌تواند هنگام خطر از آن استفاده. با توجه به موجود نبودن اطلاعات موثق در مورد این پارامتر، از مقدار پیش فرض نرم افزار (۶ متر بر مجذور ثانیه) استفاده می‌کنیم. Vaziri و Hoseini، مقدار شتاب کاهشی نرمال را با برداشت داده، در بزرگراه تهران-کرج برابر (۵ متر بر مجذور ثانیه) ذکر کردند که با توجه به آن به نظر می‌رسد شتاب (۶ متر بر مجذور ثانیه) برای مقدار حداکثر شتاب معقول باشد. Sadat Hoseini, S.M.; (Vaziri, M. 2009). شتاب کاهشی نرمال نیز برابر (۵ متر بر مجذور ثانیه) در نظر گرفته شد. میزان حساسیت رانندگان نسبت به رعایت کردن سرعت مجاز در طول مسیری که محدودیت سرعت در آن وجود دارد، به وسیله پارامتر پذیرش سرعت کنترل می‌شود که به اینصورت تعریف می‌شود: با توجه به محدودیت سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، و جدول توزیع سرعت که از داده‌های برداشت شده به دست می‌آید. از تعداد ۳۰ راننده شمارش شده، ۴ نفر از سرعت مجاز تخلف کرده‌اند، بنابراین میزان پذیرش سرعت:

$$\frac{30 - 4}{30} \times 100 = 86.5\%$$

خواهد بود که در نرم افزار برابر ۸۶٪ منظور می‌گردد.

حداقل فاصله مابین وسایل نقلیه، نشان دهنده‌ی حداقل فاصله‌ای است که راننده از خودروی جلویی خود رعایت می‌کند و آن را فاصله‌ی ایمن می‌داند. واحد این پارامتر در نرم‌افزار از جنس سرفاصله نبوده و بر حسب متر محاسبه می‌گردد. باید در نظر داشت که این پارامتر تأثیر زیادی بر روی ظرفیت و طول صف یک مقطع می‌گذارد و تعیین هر چه دقیق تر آن می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منتهی شود. برای برداشت این پارامتر از داده‌های برداشت شده از بازه‌ی زمانی ۸:۲۵ صبح (ساعت اوج ترافیک)، که جریان ترافیکی به حالت ایست - حرکت در می‌آید، استفاده می‌شود. با توجه به بررسی ۵۰ وسیله نقلیه، میانگین این مقدار

سرعت دلخواه وسایل نقلیه

(۱)

بیشینه سرعت مسیر

با بررسی و مقایسه‌ی داده‌های سرعت میانگین، مشخص شد، نتایج قبل از کالیبره کردن نرم افزار، از داده‌های برداشت شده از محل، ۱۰ درصد کوچکتر است. همچنین داده‌های بعد از کالیبره کردن نرم افزار، از داده‌های برداشت شده از محل ۳/۵ درصد بزرگتر است. در نهایت با در نظر گرفتن قدر مطلق این مقادیر، بهبود نتایجی معادل ۶/۵ درصد در خروجی نرم افزار، بعد از کالیبراسون نسبت به قبل از آن مشاهده شد.

با مقایسه‌ی داده‌های زمان سفر، مشخص شد که نتایج قبل از کالیبره کردن نرم افزار، از داده‌های برداشت شده از محل، ۱۱ درصد بزرگتر است. همچنین داده‌های بعد از کالیبره کردن نرم افزار، از داده‌های برداشت شده از محل ۲/۵ درصد کوچکتر است. در نهایت با در نظر گرفتن قدر مطلق این مقادیر، بهبود نتایجی معادل ۸/۵ درصد در خروجی نرم افزار، بعد از کالیبراسون نسبت به قبل از آن مشاهده شد.

جدول ۸. داده‌های برداشت شده در محل برداشت اطلاعات

سرعت متوسط بر حسب km/h	زمان سفر بر حسب ثانیه	
۵۷	۱۰۲	سفر اول
۴۶	۱۲۰	سفر دوم
۵۲	۱۱۴	سفر سوم

جدول ۹. نتایج حاصل برای پارامترهای زمان سفر و سرعت متوسط

۱۱۲	میانگین زمان سفر (ثانیه)
۵۱/۵	میانگین سرعت متوسط (کیلومتر بر ثانیه)

جدول ۱۰. داده‌های خروجی نرم افزار قبل از کالیبراسیون

میانگین متوسط سرعت	سرعت متوسط (km/h)	میانگین زمان سفر	زمان سفر (s)	
۴۶.۵	۴۷	۱۲۴	۱۲۸	سفر اول
	۴۹		۱۲۰	سفر دوم
	۴۳.۵		۱۲۴	سفر سوم

جدول ۱۱. داده‌های خروجی نرم افزار بعد از کالیبراسیون

میانگین متوسط سرعت	سرعت متوسط (km/h)	میانگین زمان سفر	زمان سفر (s)	
۵۳.۵	۵۵	۱۰۹	۱۰۸	سفر اول
	۵۶		۱۰۷	سفر دوم
	۵۰		۱۱۲	سفر سوم

۵- روند شبیه‌سازی منطقه‌ی عملیاتی در نرم افزار AIMSUN

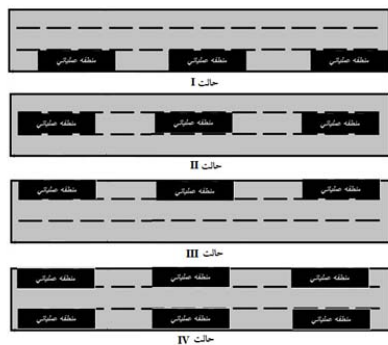
در این پژوهش طراحی مناطق عملیاتی آزاد راه‌هایی با ۲، ۳ و ۴ خط عبور، مد نظر بوده است، حالات مختلف بسته شدن هر خط عبور، برای هر یک از این مسیرها به طور جداگانه طرح و مدل سازی شد. با در نظر گرفتن اینکه مسیر با ۲ خط عبور، دو حالت مختلف، مسیر با ۳ خط عبور، چهار حالت و مسیر با ۴ خط عبور، هشت حالت مختلف مسدود شدن خطوط عبوری را



از کاهش سرعت هنگام عبور از محدوده‌ی کارگاه جاده‌ای، تأخیر ناشی از برگشت به سرعت مطلوب بعد کارگاه جاده‌ای و تأخیر ناشی از تشکیل صف، است. برای محاسبه‌ی طول این مناطق در کارگاه جاده‌ای دارید.

خواهند داشت، بنابراین، در کل، از نظر هندسی ۱۴ مدل مختلف خواهیم داشت.

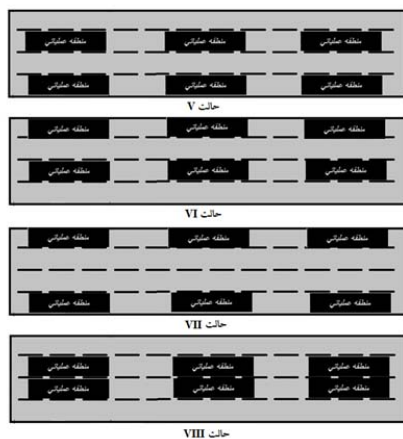
تأخیر ترافیک در مناطق عملیاتی، شامل تأخیر به علت کاهش سرعت وسایل نقلیه قبل از رسیدن به کارگاه جاده‌ای، تأخیر ناشی



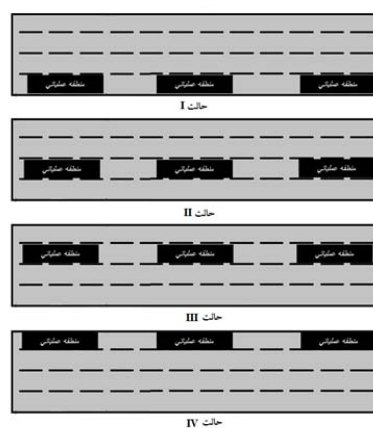
(B) حالات مختلف مسدود کردن جاده با ۳ خط عبور



(A) حالات مختلف مسدود کردن جاده با ۲ خط عبور



(D) حالات مختلف مسدود کردن جاده با ۴ خط عبور



(C) حالات مختلف مسدود کردن جاده با ۴ خط عبور

شکل ۴. حالات متفاوت هندسه منطقه عملیاتی

جدول ۱۲. شتاب و حداکثر سرعت وسایل نقلیه عبوری

حداکثر سرعت مطلوب	شتاب ترمزگیری نرمال	حداکثر شتاب	
۱۵۰	۴	۳	خودروی سواری
۱۱۰	۲	۱	اتوبوس
۱۰۰	۳.۵	۱	کامیون

با استفاده از رابطه مستقل از زمان:

$$v^2 - v_0^2 = 2a(\Delta x) \quad (2)$$

و با توجه به سرعت‌ها و شتاب‌ها در حالات مختلف شکل ۵.

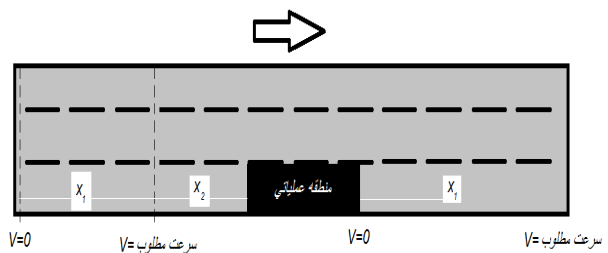
درصد عبوری کامیون نیز به همین دلیل ۳۰٪ خواهد بود، که در مدل‌ها ۵٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ در نظر گرفته شده است.

با داشتن ۱۴ مدل هندسی که در شکل ۴ به تفصیل آورده شده‌اند، ۴ حالت دبی جریان، ۳ حالت درصد کامیون، ۳ حالت طول کارگاه و ۳ حالت فاصله‌ی بین کارگاه‌ها، تعداد مدل‌های ساخته شده در نرم افزار AIMSUN برابر است با:

$$14 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3 = 1512$$

هریک از مدل‌ها با توجه به ماهیت تصادفی (Stochastic) نرم افزار AIMSUN، ۱۰ بار اجرا شده‌اند، که در نهایت ۱۵۱۲۰ بار، نرم افزار AIMSUN اجرا شده و میانگین هر ۱۰ بار اجرا در محاسبات منظور گردید.

سرعت حداکثر برای اتوبوس در آزادراه‌های ایران، ۱۱۰ کیلومتر در ساعت است، که رانندگان اتوبوس معمولاً در سرعت حداکثر مجاز حرکت می‌کنند. با توجه به برداشت اطلاعات در آزاد راه تهران- ساوه حداکثر سرعت مطلوب کامیون‌ها ۱۰۰ کیلومتر در ساعت است.



شکل ۵. مناطق سرعت- توقف مختلف یک کارگاه جاده‌ای

جدول ۱۳. محاسبه‌ی منطقه‌های مختلف یک کارگاه جاده‌ای

$X_2$	$X_1$	
۲۱۷	۲۹۰	خودروی سواری
۲۳۳	۴۷۰	اتوبوس
۱۱۰	۳۸۵	کامیون

$$x_1 = 470 \text{ m}$$

$$x_2 = 235 \text{ m}$$

پس طول مورد نیاز قبل از شروع کارگاه برابر است با:

$$x_1 + x_2 = 705 \text{ m}$$

و طول مورد نیاز بعد از کارگاه برابر است با:

$$x_1 = 470 \text{ m}$$

کارگاه‌های با فواصل بیش از ۴۷۰ متر، مستقل از یکدیگر عمل کرده و تأثیری بر یکدیگر ندارند. به همین دلیل فواصل بیشتر از ۵۰۰ متر، در شبیه سازی مد نظر قرار نگرفته است.

حجم جریان ترافیکی در مدل‌ها، ۴ حالت ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت در هر خط عبور خواهد بود. مقادیر بیش از ۲۰۰۰ وسیله نقلیه باعث ترافیک شدید شده و وسایل نقلیه به صف مجازی نرم افزار انتقال داده خواهند شد و نتایج شبیه سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

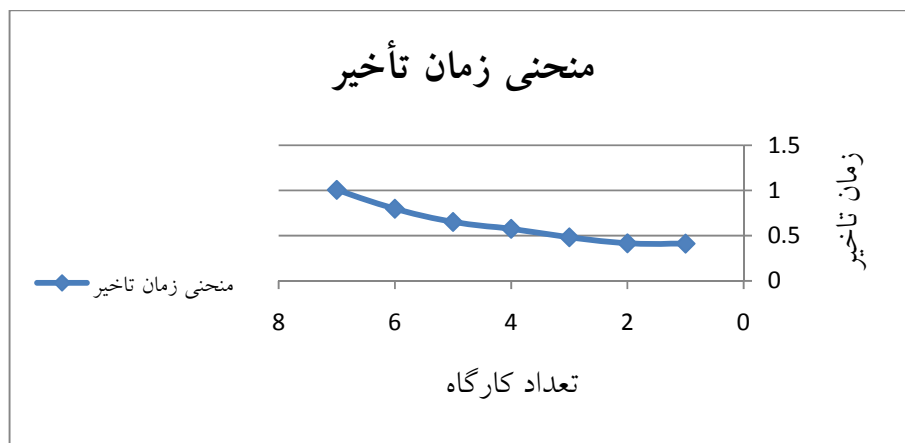
## ۶- بررسی و تحلیل نتایج حاصل از پژوهش

### ۶-۱- بررسی تأثیر تعداد کارگاه‌های جاده‌ای بر زمان تأخیر

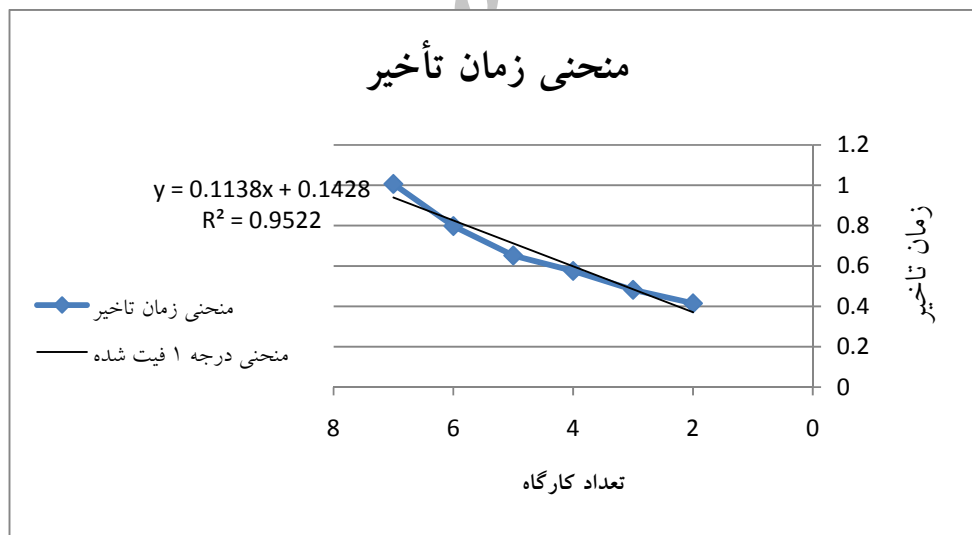
روند کلی آنالیز نشان می‌دهد به جز کارگاه اول و دوم که زمان تأخیر آنها روند خطی ندارد، افزودن کارگاه‌های دیگر به طور خطی، زمان تأخیر در هر کیلومتر طول را افزایش می‌دهند؛ بنابراین هنگامی که بیش از ۱ کارگاه در طول میسر داشته باشیم، نتایج به طور خطی افزوده شده و تنها منحنی‌های زمان تأخیر را به سمت بالا شیفت می‌دهند، که بر روی نقاط کمینه و بیشینه‌ی این منحنی‌ها تأثیری نخواهد داشت. برای مثال در منطقه‌ی عملیاتی با کارگاه‌هایی به طول ۵۰ متر و فاصله‌ی ۵۰ متر، زمان تأخیر مطابق جدول ۱۴ به دست آمد.

جدول ۱۴. تأثیر تعداد کارگاه بر زمان تأخیر

کارگاه ۷	کارگاه ۶	کارگاه ۵	کارگاه ۴	کارگاه ۳	کارگاه ۲	کارگاه ۱	زمان تأخیر (ثانیه بر کیلومتر)
۱/۰۰۷	۰/۷۹۸	۰/۶۵۲۱	۰/۵۷۵۸	۰/۴۸۲۱	۰/۴۱۵	۰/۴۱۲	



شکل ۶. تأثیر تعداد کارگاه ها در طول مسیر بر روی زمان تأخیر

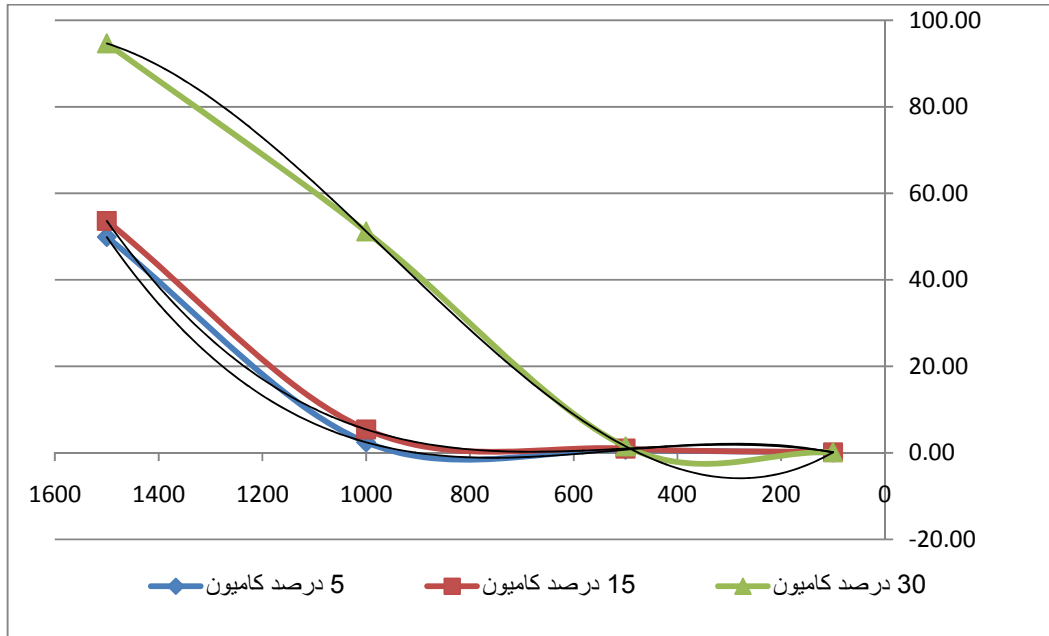


شکل ۷. تأثیر تعداد کارگاه ها در طول مسیر بر روی زمان تأخیر بدون در نظر گرفتن کارگاه اول

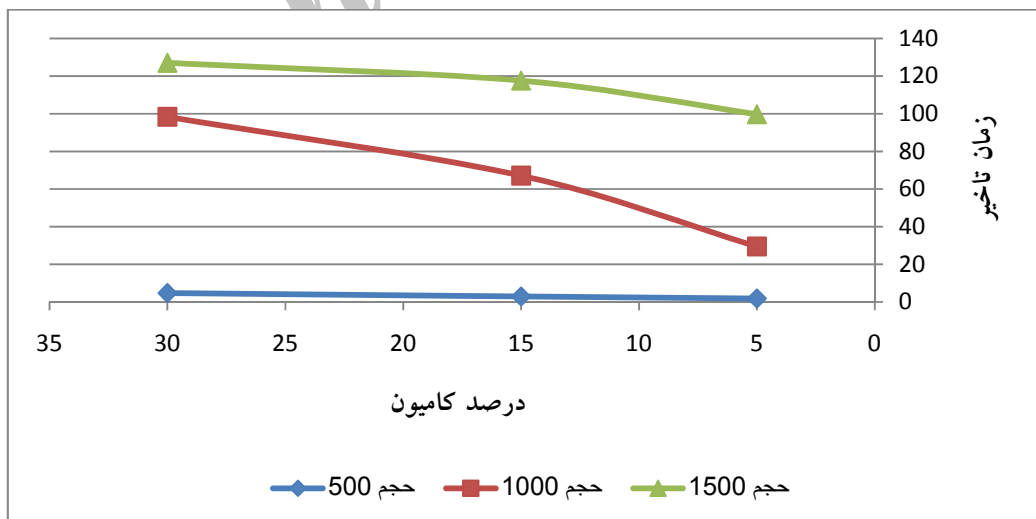
## ۲-۶- تأثیر حجم جریان بر زمان تأخیر

در شکل ۷ تغییرات زمان تأخیر در برابر تغییرات حجم عبوری در یک مسیر ۲ خطه با فواصل کارگاهی و طول ۵۰ متر را نشان می‌دهد.

با ثابت نگه داشتن ۳ پارامتر طول کارگاه، فواصل کارگاه‌ها و درصد کامیون عبوری، روند کلی یکسانی در تمام حالات مشاهده می‌گردد.



شکل ۸. تأثیر تغییر حجم جریان بر زمان تأخیر



شکل ۹. بررسی تأثیر درصد کامیون بر زمان تأخیر

این منحنی‌ها را می‌توان به صورت یک تابع خطی درجه ۳، با دقت بالا ( $R^2$  نزدیک به ۱) تخمین زد.

$$T = a_1 Q^3 + a_2 Q^2 + a_3 Q + a_4 \quad (3)$$

در جدول ۱۵ ضرایب و دقت برازش منحنی بر داده‌ها برای ۳ منحنی شکل ۱ داده شده است:

جدول ۱۵. ضرایب رابطه حجم و زمان تأخیر (۳ درصد متفاوت کامیون)

کامیون عبوری	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$R^2$
۵٪	$-9 \times 10^{-2}$	۰	-0/115	9/4	۱
۱۵٪	$6 \times 10^{-2}$	$-8 \times 10^{-5}$	0/034	-2/55	۱
۳۰٪	$6 \times 10^{-1}$	۰	0/041	-3/155	۱

### ۳-۶- تأثیرات درصد کامیون عبوری بر زمان تأخیر

با توجه به آنکه درصد کامیون عبوری نیز از جنس دبی جریان ترافیکی است، انتظار می‌رود که تأثیرات تغییر درصد

جدول ۱۶. تعیین ضرایب رابطه ی حجم و زمان تأخیر برای ۳ دبی متفاوت

حجم عبوری	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$
۵۰۰	۰	0/095	1/402	۱
۱۰۰۰	-0/067	5/103	5/631	۱
۱۵۰۰	-0/046	2/705	87/40	۱

کامیون عبوری، همچون اثر تغییرات دبی عبوری خودروهایی سواری باشد. روند کلی این منحنی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر درصد کامیون عبوری به صورت تابع درجه ۲ می‌باشد.

$$T = a_1 P^2 + a_2 P + a_3 \quad (4)$$

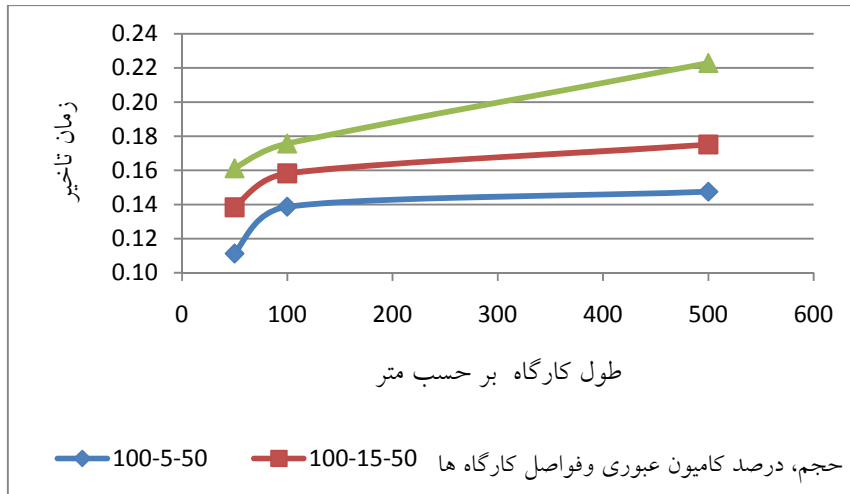
شکل ۹ و جدول ۱۶ ضرایب و دقت فیت کردن منحنی بر داده‌ها برای یک مسیر ۴ خطه‌ی حالت انسداد VI، با طول کارگاه ۵۰۰ و فواصل ۱۰۰ متری به دست می‌دهد. با بررسی داده‌های تغییر درصد کامیون عبوری بر زمان تأخیر، نکاتی چند مشخص می‌گردد:

- هرچه طول کارگاه جاده‌ای بیشتر باشد، منحنی بیشتر به تابع چند جمله‌ای درجه ۲ شبیه می‌گردد و طول کمتر آن، منحنی را به سمت یک خط راست سوق می‌دهد.
- افزایش فاصله‌ی بین کارگاه‌ها مقادیر زمان تأخیر را افزایش داده و منحنی‌ها به سمت بالا شیف‌ت پیدا می‌کنند. Aadeli و Karim نیز اثر درصد کامیون را بر ظرفیت مسیر، بسیار بالا ارزیابی کردند (Aadeli, Karim, 2006).

- افزایش طول کارگاه‌ها، اندکی مقادیر زمان تأخیر را افزایش می‌دهد.

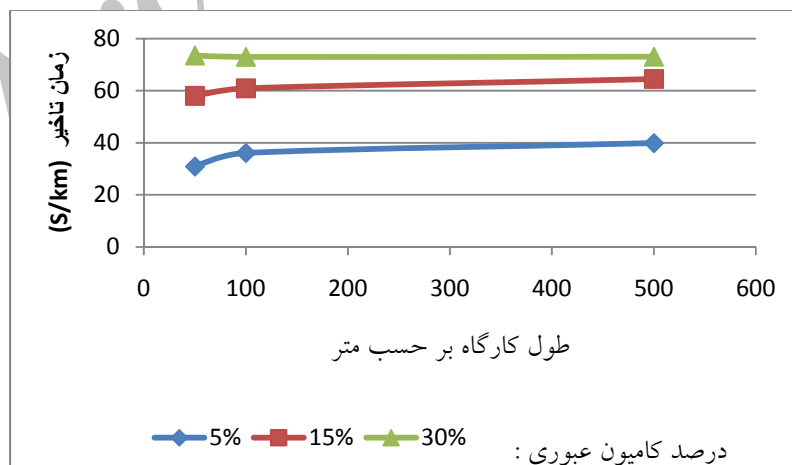
### ۴-۶- تأثیر طول کارگاه‌ها بر زمان تأخیر

با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقادیر زمان تأخیر در برابر طول‌های مختلف کارگاه، نشان دهنده‌ی تأثیر این پارامتر بر زمان سفر خواهد بود. شکل ۱۰، روند تغییرات زمان تأخیر را با افزایش طول کارگاه جاده‌ای، برای سه مقدار متفاوت درصد کامیون و دبی جریان ترافیکی پایین (۱۰۰ و سیله‌ی نقلیه در ساعت در هر خط عبور) نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. بررسی تأثیر طول کارگاه‌ها بر زمان تأخیر

- با بررسی داده‌های مشابه، به نظر می‌رسد:
  - با افزایش درصد کامیون، نمودارها به سمت بالا شیب‌دار پیدا می‌کنند، یعنی زمان تأخیر آنها به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. (این افزایش به صورت خطی اتفاق می‌افتد)؛
  - در حجم جریان عبوری کمتر از ۱۰۰ وسیله نقلیه در ساعت، افزایش زمان تأخیر با افزایش طول کارگاه جاده‌ای، در ابتدا به صورت لگاریتمی در ارتباط بوده و پس از مدتی، روندی خطی بخود می‌گیرد؛
- اما در دبی‌های بالاتر از ۱۰۰۰ و درصد کامیون عبوری بالای ۲۰ درصد، این روند حالتی نزولی پیدا کرده و با افزایش طول کارگاه جاده‌ای، زمان تأخیر کاهش می‌یابد. برای مثال روند نمودارهای شکل ۱۰، برای دبی ۱۵۰۰ وسیله نقلیه و درصد کامیون‌های مختلف، در مسیر با ۳ خط عبور، که خط عبور سمت راست آن بسته شده رسم شده است.



شکل ۱۱. بررسی تأثیر طول کارگاه‌ها در دبی جریان بالا بر زمان تأخیر

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳

ایجاد شده در گلوگاه باعث کم شدن سرعت میانگین خودروهای سواری شده و عبور کامیون‌ها را تسهیل می‌کند.

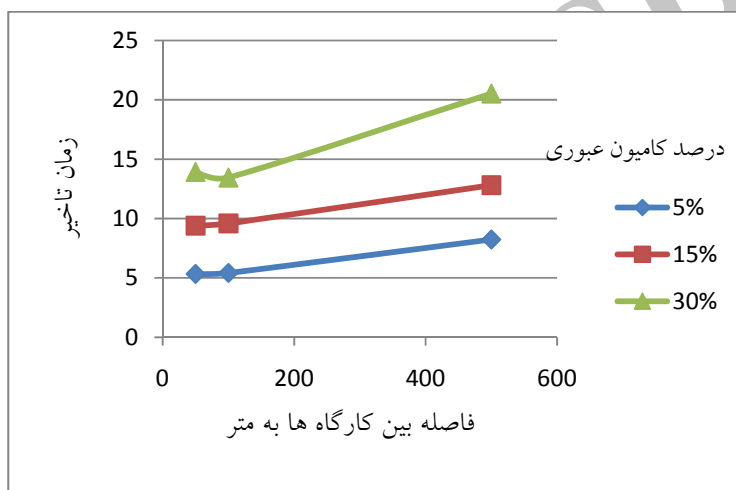
از آنجا که بخش بزرگی از زمان تأخیر کل، ناشی از زمان تأخیر کامیون‌هاست، با تسهیل عبور کامیون‌ها، زمان تأخیر کل کاهش می‌یابد. Benekolah نیز به همین نتیجه رسیده است (Benekolah, F; Chitturi, V. 2007).

#### ۶-۵- تأثیر فواصل بین کارگاه‌ها بر زمان تأخیر

در افزایش فواصل بین کارگاهی، نمودارها به صورت خطی افزایش می‌یابند که نشان دهنده برقراری رابطه‌ای خطی بین این دو پارامتر است.

در دبی بالای ۱۰۰۰ وسیله نقلیه، هنگامی که درصد کامیون عبوری از ۲۰٪ بیشتر شود، با افزایش طول کارگاه، زمان تأخیر روند نزولی می‌یابد.

دلیل این پدیده آن است که، هر چه سرعت میانگین وسایل نقلیه بیشتر باشد، وسایل نقلیه‌ی سواری از گلوگاه به وجود آمده، راحت‌تر عبور کرده و کامیون‌هایی که در خط عبور بسته شده هستند، مدت زمان بیشتری برای تغییر خط عبوری و طی کردن ادامه‌ی مسیر، نیاز دارند. به همین دلیل زمان تأخیر میانگین کامیون‌ها معمولاً بالاست. اما هنگامی که دبی جریان زیاد شود، با افزایش طول کارگاه، ظرفیت مسیر کاهش یافته و ترافیک سنگین



شکل ۱۲. بررسی تأثیر فواصل کارگاه‌ها بر زمان تأخیر

تأخیر یا کاهش می‌یابد و یا با روند کمتری نسبت به بقیه‌ی نمودار افزایش می‌یابد.

- به نظر می‌رسد دلیل این امر به فاصله‌ی دید رانندگان برمی‌گردد. طبق آیین‌نامه راه، فاصله‌ی مشاهده، تصمیم‌گیری و واکنش، مسافتی است که خودرو در مدت مشاهده، تصمیم‌گیری و واکنش راننده، برای ترمز کردن طی می‌کند و این مقدار در آیین‌نامه‌ی طرح هندسی راه‌ها، برابر ۲/۵ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

با بررسی داده‌های تغییر فواصل کارگاهی بر زمان تأخیر، نکاتی چند مشخص می‌گردد:

- همان‌طور که در این نمودارها مشخص است می‌توان رابطه‌ی بین زمان تأخیر با فواصل کارگاهی را با تقریب مناسبی با رابطه‌ی خطی، تخمین زد.
- نکته‌ی مهمی که در این میان دیده می‌شود کمتر و یا حتی نزولی بودن بودن شیب نمودارها در بازه‌ی ۵۰ تا حدوداً ۸۰ متری این منحنی‌هاست، به عبارت دیگر وقتی فاصله‌ی بین کارگاه‌ها ۵۰ تا ۸۰ متر است، زمان

جدول ۱۷. نتایج زمان تأخیر به دست آمده برای یک مسیر با ۲ خط

عبور

۱۰۰۰ خودرو در ساعت	۱۵۰۰ خودرو در ساعت	
147/595	172/365	حالت I
139/178	170/725	حالت II

در حالت دوم، بین ۱ تا ۶/۵ درصد، در مقادیر زمان تأخیر، تفاوت وجود دارد. نتایج به دست آمده برای یک مسیر با ۳ خط عبور:

جدول ۱۸. نتایج زمان تأخیر به دست آمده برای یک مسیر

با ۳ خط عبور

۱۰۰۰ خودرو در ساعت	۱۵۰۰ خودرو در ساعت	
27.1655	72.8581	حالت I
45.9988	96.66	حالت II
17	72.27	حالت III

حالت دوم (مسدود کردن خط وسط) بدترین حالت بین ۳ حالت مسدود کردن یک خط عبور از مسیر با ۳ خط عبور، و حالت سوم (بستن خط سرعت) بهترین حالت از لحاظ تأخیر زمانی خواهد بود. تفاوت محسوسی بین این زمان تأخیرها احساس می‌شود. برای مثال در دبی ۱۰۰۰ خودرو در ساعت، زمان تأخیر از ۴۶ ثانیه در کیلومتر در حالت دوم، به ۱۷ ثانیه در کیلومتر، در حالت سوم (یعنی بیش از ۲ برابر) کاهش یافته است. Kim et al, (Kim et al, 2004). نتایج به دست آمده برای یک مسیر با ۴ خط عبور:

جدول ۱۹. نتایج زمان تأخیر به دست آمده برای یک مسیر با ۴ خط

عبور (یک خط مسدود)

۱۰۰۰ خودرو در ساعت	۱۵۰۰ خودرو در ساعت	
10/17	48/52	حالت I
19/57	58/91	حالت II
7/30	56/17	حالت III
6/84	46/66	حالت IV

اگر حداکثر سرعت رانندگان را ۱۱۰ کیلو متر بر ساعت در نظر

بگیریم، خواهیم داشت:

سرعت بر حسب متر بر ثانیه:

$$110 \text{ km/h} = 30/5 \text{ m/s}$$

فاصله‌ی دید برای این سرعت:

$$30/5 \times 2/5 = 75 \text{ متر}$$

که تقریباً همان فاصله‌ی بهینه برای فواصل بین کارگاه‌هاست.

(با فرض ثابت بودن سایر پارامترها)

در این فاصله‌ی ۷۵ متری، رانندگان، کارگاه جاده‌ای بعدی را می‌بینند و وارد آن خط نمی‌شوند، بنابراین، هر چه فاصله‌ی بین کارگاه‌های عملیات راهداری افزایش صاف اتومبیل در بالادست این مناطق بوجود نیامده و زمان تأخیر کمینه می‌شود. در فواصل بیش از ۷۵ متر، یابد، رانندگان بیشتری به خط عبور بسته شد وارد می‌شوند که این خود زمان تأخیر را افزایش می‌دهد.

## ۶-۶- بررسی تاثیر شماره‌ی خط عبور مسدود شده بر زمان تأخیر

هنگامی که تصمیم به مسدود کردن چند خط عبور یک مسیر گرفته می‌شود، برای برنامه‌ریزی هر چه بهتر منطقه عملیاتی، و کمینه شدن زمان تأخیر لازم است تا در ساعات اوج ترافیکی، خط عبوری که تأثیر کمتری بر زمان تأخیر مسیر دارد، مسدود گردد. بر همین اساس مقایسه‌ی تاثیر شماره‌ی خط عبور مسدود شده بر زمان تأخیر، و شناسایی خط عبور با تاثیرات کمتر ترافیکی بر جریان، می‌تواند به طراح در زمینه‌ی کمینه کردن مقادیر زمان تأخیر منطقه‌ی عملیاتی کمک نماید. در بررسی داده‌های حاصل از شبیه سازی‌ها، نتایج زیر مشاهده می‌شود:

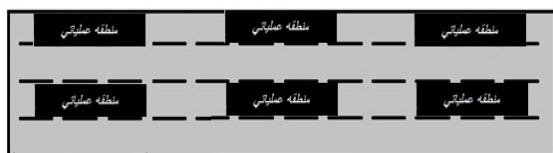
حالات مختلف مسدود کردن خطوط عبور مسیر، در شکل ۴ آورده شده است.



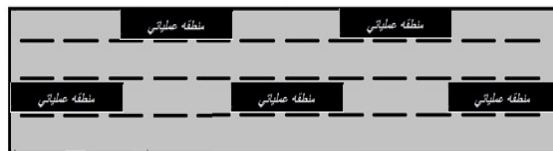
تفاوت زیادی که بین زمان تأخیرها در حالات مختلف مسدود کردن یک مسیر وجود دارد، نشان دهنده نقش مهم و موثر برنامه‌ریزی برای مناطق عملیاتی، به خصوص در جاده‌های پرتردد و مهم مواسلاتی کشور است.

#### ۶-۹- مقایسه‌ی تاثیر یکنواختی کارگاه‌ها در مناطق عملیاتی با ۲ خط مسدود

هنگامی که قرار است ۲ خط عبور از یک مسیر با ۴ خط عبور، مسدود گردد، می‌توان با جا به جایی کارگاه‌ها، ترکیب هندسی منطقه عملیاتی را تغییر داد. این تغییر در هندسه‌ی منطقه‌ی عملیاتی، می‌تواند بر پارامترهای ترافیکی از جمله زمان تأخیر، موثر باشد. دو شکل ۱۳ و ۱۴ به درک بهتر اصطلاح یکنواختی کارگاه‌ها، کمک می‌کنند:

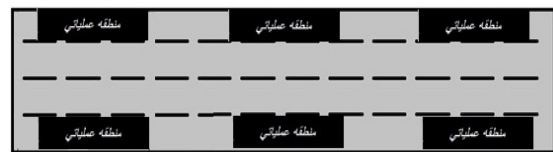


A

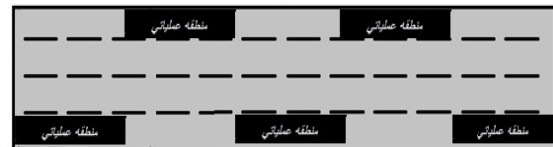


B

شکل ۱۳. جا به جایی مناطق عملیاتی



C



D

شکل ۱۴. جابه‌جایی مناطق عملیاتی

مانند مسیرهای با ۲ و ۳ خط عبور، کمترین تأثیر مسدود کردن یک خط عبور از مسیر، در بستن خط عبور سرعت اتفاق می‌افتد. بیشترین زمان تأخیرها نیز در ۲ خط عبور وسط اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد علت این امر آن است که خط عبور وسط بر ۲ خط عبور کناری تأثیر گذاشته و با افزایش حرکات در هم‌تیدگی (Weaving)، ظرفیت آنها را کاهش می‌دهند. در حالی که خطوط عبور لبه‌ی جاده تنها بر یک خط عبور موثرند.

#### ۶-۸- بررسی حالات مختلف مسدود کردن همزمان ۲ خط عبور

۴ حالت مختلف مسدود کردن همزمان ۲ خط عبور از یک مسیر ۴ خطه، وجود دارد که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که ۴ حالت دیگر مسدود کردن همزمان ۲ خط عبور از یک مسیر ۴ خطه، به علت زمان تأخیرهای بالای ناشی از آنها، در نظر گرفته نشدند.

داده‌های زمان تأخیر در یک جاده‌ی با ۴ خط عبور برای حالات V ، VI ، VII و VIII به صورت زیر است :

جدول ۲۰. نتایج زمان تأخیر به دست آمده برای یک مسیر با ۴ خط عبور (۲ خط مسدود)

حالت	دبی 1000 خودرو در ساعت	دبی 1500 خودرو در ساعت
حالت V	149/24	175/64
حالت VI	108/71	136/41
حالت VII	139/67	172/27
حالت VIII	138/38	169/1

کمترین زمان تأخیرها (در دبی بیش از 1000 خودرو در ساعت) به ترتیب مربوط است به: VI ، VII ، VIII ، V در شرایط یکسان، بستن خط عبور پر سرعت‌تر، تأثیر کمتری بر افزایش زمان تأخیر می‌گذارد (مقایسه بین حالت V ، VI).

جدول ۲۱. نتایج زمان تأخیر برای طول و فواصل ۱۰۰ متری کارگاه برای درصد کامیون ۳۰٪

دبی جریان	حالت A	حالت B	حالت C	حالت D
۱۰۰ خودرو در ساعت	0/218	0/207	0/211	0/2
۵۰۰ خودرو در ساعت	3/957	3/63	3/796	3/27
۱۰۰۰ خودرو در ساعت	100/368	90/95	135/048	99/27
۱۵۰۰ خودرو در ساعت	129/231	115/34	165/965	138/021

یکدیگر، مقدار زمان سفر برای هر وسیله نقلیه، کمینه شود. در این روند از روش آماری حداقل مربعات<sup>۱</sup>، در شالوده‌ی نظری مدل استفاده شده است.

از دیگر روش‌های آماری مدل‌سازی داده‌ها می‌توان به روش‌های B - اسپلاین<sup>۱۱</sup>، درون یابی لاگرانژ<sup>۱۲</sup>، درون یابی هرمیت<sup>۱۳</sup> و ... اشاره کرد، که در فضای بیش از ۳ بعد، محاسبات بسیار سنگین و وقت‌گیری دارند.

#### ۷-۱- روش حداقل مربعات

اصول کلی یک برازش به روش حداقل مربعات، به صورت اجمالی به شرح زیر است:  
ابتدا تابع چندجمله‌ای را به صورت یک تابع غیر خطی به صورت رابطه‌ی ۵ انتخاب می‌گردد:

$$p(x) = a(X_1^b + X_2^c + (X_1 X_2)^d) + e \quad (5)$$

که  $x_1$  طول کارگاه،  $x_2$  فاصله‌ی بین کارگاه‌ها و  $p(x)$  عبارتست از زمان تأخیر سفر. منطبق‌ترین رابطه‌ی ممکن بر نقاط به دست آمده از نتایج تحلیل زمان تأخیر، به فرم کلی رابطه‌ی ۵ می‌باشد که در پیوست ۱، مثال‌هایی از آن آورده شده است. در هر یک از نمونه‌های پیوست ۱، از ۶۰ نقطه جهت رگرسیون، استفاده شده است. غیر خطی بودن رابطه باعث می‌گردد اثرات متقابل پارامترها بر یکدیگر، در نظر گرفته شود.

با داشتن داده‌های زمان تأخیر، حاصل از شبیه‌سازی، ضرایب معادله را بگونه‌ای می‌یابیم که S در رابطه‌ی ۶، کمینه گردد:

$$S = \sum_{i=1}^m (y_i - p(x_i))^2 \quad (6)$$

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳

جدول ۲۱، نتایج زمان تأخیر حاصل از شبیه‌سازی حالات مختلف ذکر شده در اشکال ۱۳ و ۱۴ برای حالت زیر نشان می‌دهد: طول ۱۰۰ متری کارگاه، فواصل کارگاه‌های ۱۰۰ متری، ۳۰ درصد کامیون مقایسه بین دو حالت A و B کاهش ۸ درصدی، و مقایسه بین دو حالت C و D کاهش ۲۰ درصدی زمان تأخیر، بین حالتی که کارگاه‌ها روبروی یکدیگرند و حالتی که کارگاه‌ها به صورت یک در میان اجرا می‌شوند را، نشان می‌دهد. با بررسی داده‌های مربوطه به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان بیان کرد، اگر کارگاه‌ها در کنار یکدیگر برپا نشوند، زمان تأخیر کاهش می‌یابد.

به نظر می‌رسد علت این موضوع، به طرح هندسه منطقه‌ی عملیاتی مرتبط است. در حالتی که کارگاه‌ها در کنار یکدیگر قرار ندارند، وسایل نقلیه مجبورند برای تامین فاصله‌ی ایمن جانبی با دیگر وسایل نقلیه، به داخل مناطق بین ۲ کارگاه برانند. این استفاده‌ی بهینه از این مناطق باعث افزایش ظرفیت منطقه‌ی عملیاتی شده و ترافیک روان‌تری در منطقه‌ی عملیاتی پدید می‌آید. البته این تاثیر در فواصل بین کارگاهی بیش از ۱۰۰ متر مشهود است، و در صورت کم شدن این فاصله تاثیرات تغییر هندسی منطقه‌ی عملیاتی، ناچیز خواهد بود.

#### ۷- توسعه مدل بهینه‌سازی منطقه‌ی کارگاهی

پس از جمع‌آوری داده‌های خروجی از نرم افزار AIMSUN سعی شد تا با محاسبه‌ی طول و فاصله‌ی بهینه‌ی کارگاه‌ها از

تاخیر را به سمت بالا شیفت می‌دهند. تغییرات زمان تأخیر منطقه‌ی عملیات راهداری بر اثر تغییر دبی جریان، با دقت بالا قابل پیش بینی است. این تغییرات از یک منحنی درجه ۲ به فرم کلی زیر تبعیت می‌کند:

$$T\left(\frac{s}{km}\right) = a_1 Q^3 + a_2 Q^2 + a_3 Q + a_4 \quad (8)$$

تغییرات زمان تأخیر منطقه‌ی عملیات راهداری، بر اثر تغییر درصد کامیون عبوری نیز شبیه به تغییرات زمان تأخیر ناشی از تغییر دبی جریان بوده و با تابع درجه ۲، با دقت بالایی قابل تخمین است. هرچه طول کارگاه‌ها بیشتر باشد، این تابع بیشتر به یک منحنی درجه ۲ نزدیک می‌شود. به نظر می‌رسد چون افزایش طول کارگاه، زمان تأخیر را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد، مدل تخمین زمان تأخیر در برابر درصد کامیون عبوری نیز به تابع درجه ۲ نزدیک می‌شود. بررسی روند تأثیر طول کارگاه‌های جاده‌ای بر زمان تأخیر، نشان دهنده‌ی آن است که: با افزایش دبی جریان، زمان تأخیر ابتدا به صورت لگاریتمی و در ادامه به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ در دبی‌های عبوری بالای ۱۰۰۰ وسیله‌ی نقلیه در ساعت، و درصد کامیون بالای ۲۰ درصد، با افزایش طول کارگاه جاده‌ای، زمان تأخیر اندکی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد دلیل این پدیده آن است که، هنگامی که جریان ترافیکی زیاد شده و درصد کامیون افزایش می‌یابد، با افزایش طول کارگاه، ظرفیت مسیر کاهش یافته و ترافیک سنگین ایجاد شده در گلوگاه باعث کم شدن سرعت میانگین خودروهای سواری شده و عبور کامیون‌ها را تسهیل می‌کند.

۱- در بررسی تأثیر فواصل بین کارگاهی بر روی زمان تأخیر، نمودارها به صورت خطی افزایش می‌یابند که نشان دهنده‌ی برقراری رابطه‌ی خطی بین این دو پارامتر است که با تقریب مناسبی قابل محاسبه است. نکته‌ی قابل ذکر در این قسمت آن است که، وقتی فاصله‌ی بین کارگاه‌ها ۵۰ تا ۸۰ متر است، زمان تأخیر یا کاهش می‌یابد و یا با روند کمتری نسبت به بقیه‌ی نمودار افزایش می‌یابد، توسط فاصله‌ی دید (۷۵ متری) رانندگان توجیه شد.

$\gamma_i$  مقادیر زمان تأخیر حاصل از شبیه سازی در نرم افزار AIMSUN و  $p(x_i)$  در رابطه‌ی ۵ تعریف شده است.

مدل نرم‌افزاری توسعه داده شده، با دریافت شماره‌ی خطوط عبور مسدود شده، مقادیر حجم عبوری جریان و درصد کامیون عبوری، برای مسیری با تعداد خطوط مشخص سعی می‌کند تا بهترین رویه را داده‌های مربوط به زمان تأخیر مسیر مربوطه که از شبیه سازی نرم‌افزاری منطقه‌ی عملیاتی در AIMSUN به دست آمدند، برازش کند. که فرم کلی آنها به صورت رابطه‌ی ۵ خواهد بود. با مشخص شدن ضرایب  $a_i$ ، رابطه‌ی ۵، بصورت معادله‌ای با ضرایب معلوم، به دست می‌آید. با کمینه کردن رابطه‌ی به دست آمده، بر اساس مشتق‌گیری در فضای ۳ بعدی، مقدار زمان تأخیر  $p(x)$ ، کمینه خواهد شد:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial p(x)}{\partial x_2} = 0 \quad (9)$$

حال با داشتن ۲ معادله و ۲ مجهول حاصل از رابطه‌ی ۷، مقادیر  $x_1$  و  $x_2$ ، که همان ترکیب طول و فاصله‌ی بهینه‌ی بین کارگاهی است، به دست خواهد آمد. در نهایت، مدل شرح داده شده، جهت سرعت و سهولت کاربرد، با کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB تبدیل به یک بسته‌ی نرم‌افزاری شد.

## ۸- نتیجه گیری

کالیبره کردن پارامترهای نرم افزار شبیه ساز AIMSUN، باعث شد تا نتایج حاصل از اعتبار سنجی نرم افزار (زمان سفر و سرعت میانگین وسایل نقلیه)، به مقدار قابل توجهی به داده‌های برداشت شده‌ی میدانی از محل برداشت داده‌ها، نزدیک شوند. نتایج این اعتبار سنجی ارایه شده است. بررسی روند تأثیر تعداد کارگاه‌های جاده‌ای بر زمان تأخیر، نشان دهنده‌ی آن است که، زمان تأخیر با افزایش تعداد کارگاه‌ها، به صورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش تعداد کارگاه‌ها در طول مسیر، بر مقادیر زمان تأخیر به صورت خطی تأثیر گذاشته و نمودارهای زمان

## ۱۰- مراجع

- Benekolah, F; Chitturi, V. (2007) "Effect of work zone length and speed difference between the vehicle types on delay based passenger car". 87<sup>th</sup> TRB Annual Meeting and Publication in TRR.
- Dudek, Conrad L.; Richards, Stephen H. (1982) "Traffic Capacity through Urban Freeway Work Zones in Texas". Transportation Research Record, No. 869.
- Jiang, Y. (1999) "Traffic Capacity, Speed, and Queue-Discharge Rate of Indiana's Four-Lane Freeway Work Zones". Transportation Research Record, No. 1657.
- Karim, Asim; Adeli, Hojjat. (2006) "Radial Basis Function Neural Network for Work Zone Capacity and Queue Estimation". Journal of Transportation Engineering.
- Kim, Taehyung; Lovell, David J.; Paracha, Jawad. (2004) "A New Methodology to Estimate Capacity for Freeway Work Zones". TRB 80<sup>th</sup> Annual Meeting Washington, DC.
- Martinelli, D.R; Xu, D. (1996) "Delay Estimation and Optimal Length for Four-Lane Divided Freeway Work Zones". Journal of Transportation Engineering ASCE, Vol. 122(2), pp.114-122.
- Memmott, Jeffery L.; Dudek, Conrad L. (1984) "Queue and User Cost Evaluation of Work Zones (QUEWZ)". Transportation Research Record, No. 979.
- McCoy, P.T; Pang, M; Post, E.R. (1980) "Optimum Length Of Two Lane Two Way No-Passing Traffic Operation in Construction and Maintenance Zones on Rural Four-Lane Divided Highways". Transportation Research Report 773, pp. 20-24.

۲- شماره‌ی خط مسدود شده، تأثیر غیر قابل چشم پوشی بر میزان زمان تأخیر منطقی عملیات راهداری دارد. مسدود کردن خطوط عبور میانی، به علت به وجود آمدن حرکات تداخلی در ۲ خط کنار آنها، بیشترین زمان تأخیرها و بستن خط عبور پرسرعت‌تر، کمترین تأثیر منفی بر زمان تأخیر منطقی عملیاتی خواهد داشت.

۳- تأثیر جابه‌جا نمودن کارگاه‌های جاده‌ای (شکل ۱۳ و ۱۴)، در فواصل بین کارگاهی بیش از ۱۰۰ متر، غیر قابل چشم پوشی است و طراح برای مسدود کردن ۲ خط عبور باید حتماً این مسئله را مد نظر قرار دهد.

۴- مدل توسعه داده شده، از کمینه کردن رابطی زیر که بهترین برازش را بر نتایج زمان تأخیر حاصل از شبیه سازی به دست می‌دهد، برای یافتن طول و فاصله‌ی بهینه کارگاه‌ها، استفاده می‌کند:

$$p(x) = a(X_1^b + X_2^c + (X_1 X_2)^d) + e \quad (9)$$

و با روش آماری حداقل مربعات، ضرایب مجهول را می‌یابد.

## ۹- پی‌نوشت‌ها

- 1-Measure of Effectiveness
- 2-Intelligent Transportation Systems
- 3-Advanced Traffic Management Systems
- 4-Radial Basic Function
- 5-Transition Area
- 6-Work Space
- 7-Calibrate
- 8-Weaving
- 9-Distance Zones
- 10-Least Square
- 11-B-Spline
- 12-Lagrange Interpolation
- 13-Hermite Interpolation

- Sadat Hoseini, S.M.; Vaziri, M. (2009) "Estimating Crash Risk Using a Microscopic Traffic Model". Journal of Scientia Irania. Transaction A: Civil Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 226-237.
- Schonfeld, P; Chen, C. (2005) "Work Zone Lengths for a Four-Lane Road". Journal of Transportation Engineering. (ASCE), 0733-947X (2005)131:10(780).
- Schonfeld, P; Tien, S.L. (2006) "Duration versus Cost Tradeoffs in Work Zones Optimization". Transportation Research Board Annual Meeting 2006 Paper #06-1789.
- Son, Young Tae. (1999) "Queuing Delay Models For Two-Lane Highway Work Zones". Transportation Research Part B 33. 459-471.
- TSS Transport Simulation Systems. (2012) "Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6.1 User's Manual".
- Ullman, G.L; Dudek, C.L. (2003) "A Theoretical Approach to Predict Traffic Queues At Short Terms Work Zones On High Volume Roadways In Urban Areas". 82<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, DC January.
- McCoy, P.T; Peterson, D.J. (1987) "Safety Effects of Two-Lane Two-Way Segment Length through Work zones On Normally Four-Lane Divided Highways". Transportation Research Report 1163, pp. 15-21.
- Michael J Cassidy; Robert L Bertini. (1998) "Some Traffic Features at Freeway bottlenecks". Department of Civil and Environmental Engineering, Institute of Transportation Studies, University of California, 109 McLaughlin Hall, Berkeley, CA 94720, USA.
- Pain, Richard F.; McGee, Hugh W.; Knapp, B.G. (1981). "Evaluation of Traffic Control for Highway Work zones". Transportation Research Board, NCHRP Report.
- Qian, H; Jing, S. (2008). "Optimizing Work Zones for Two-Lane Urban". Journal of Tsinghai Science and Technology, Volume 13, Number 5, pp. 644-650.
- Rouphail, N.M.; Yang, Z.S; Fazio, J. (1988) "Comparative Study of Short- and Long-Term Urban Freeway Work Zones". Transportation Research Record, No. 1163.
- Ramezani, H; Benekolah, R. (2011) "Analysis of Queue Formation and Dissipation in Work Zones". 6<sup>th</sup> International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service. pp. 450-460.

## پیوست ۱

### مدل تخمین زمان تأخیر

مدل کلی:

$$Y = a(X_1^b + X_2^c + (X_1X_2)^d) + e$$

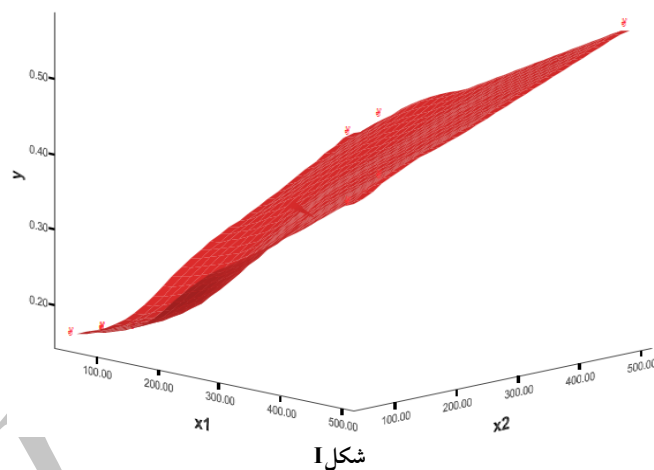
که  $X_1$  طول کارگاه و  $X_2$  فاصله‌ی بین کارگاه‌ها به متر، و  $Y$  زمان تأخیر به ثانیه در کیلومتر هستند.

نمونه اول:

مسیر ۲ خطه حالت I، دبی جریان ۱۰۰ و درصد کامیون ۵

$$R^2 = 0.788$$

$$Y = 0.097(X_1^{0.0001} + X_2^{0.0004} + (X_1X_2)^{0.000004}) + \varepsilon$$

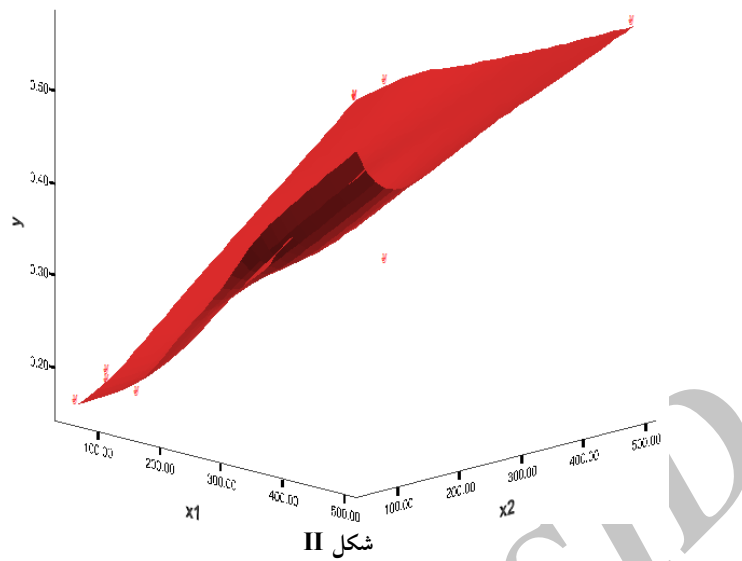


نمونه دوم:

مسیر ۳ خطه حالت چهارم، دبی ۱۰۰۰، درصد کامیون ۵

$$r^2 = 0.854$$

$$Y = 0.118(X_1^{0.0004} + X_2^{0.0001} + (X_1X_2)^{0.000004}) + \varepsilon$$



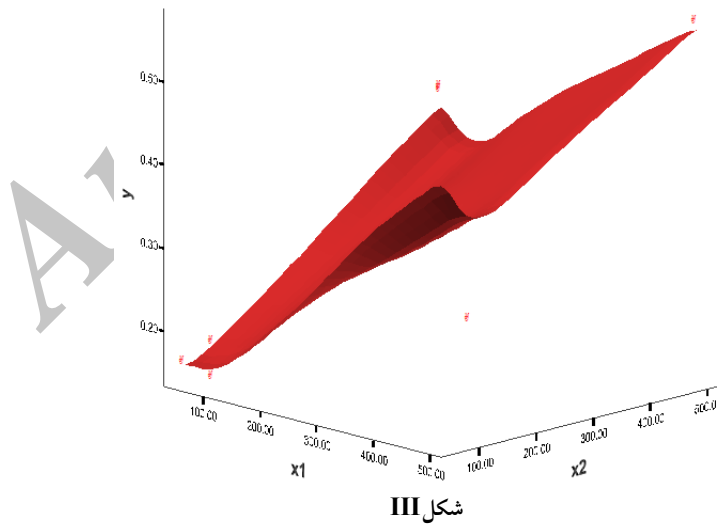
شکل II

نمونه سوم:

مسیر ۴ خطه حالت III، دبی ۱۰۰، درصد کامیون ۱۵

$$R^2=0.762$$

$$Y=0.102(X1^{0.0003}+X2^{0.001}+(X1X2)^{0.000003})+\varepsilon$$



شکل III

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳