

ارائه روشی برای تحلیل حساسیت پارامترهای شبیه سازهای ترافیک مطالعه موردی: مدل گلوگاه آزادراهی در شبیه ساز ویسیم

محمود رئوفی^۱، افشین شریعت مهیمنی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل و نقل،
raoufi_mahmoud@harkatepaydar.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، دکتری برنامه ریزی حمل و نقل، shariat@iust.ac.ir

چکیده

ریزشبیه سازهای ترافیک پارامترهای زیادی دارند که باید قبل از بکارگیری، تنظیم یا به اصطلاح کالیبره شوند. بیشتر فرایندهای ارائه شده برای کالیبراسیون این نرم افزارها به صورت مسئله کمینه سازی اختلاف میان نتایج شبیه سازی و اندازه گیریهای میدانی با یک روش جستجوی ابتکاری هستند. بنابراین هرچه فضای جستجوی پارامترهای کالیبراسیون کوچکتر باشد، پاسخ صحیح در زمان کمتر و با اطمینان بیشتری به دست می آید. از این رو بهتر است در کالیبراسیون فقط بر پارامترهای موثر تمرکز شود. برای تعیین این پارامترها باید از روشهای تحلیل حساسیت استفاده گردد. در تحلیل حساسیت شبیه سازهای ترافیک باید اثر اصلی و اندرکنش پارامترها مد نظر قرار گیرد. با وجود اهمیت مرحله تحلیل حساسیت، این مرحله در بیشتر روشهای کالیبراسیون ارائه شده به طور کامل توضیح داده نشده است و در بعضی موارد نیز روشهای کم دقت مانند «یک عامل در زمان» و یا روشهای وقت گیر و بعضاً غیر قابل استفاده در شرایط واقعی، مانند «آزمایش چند عاملی کامل» معرفی گردیده است. در این مقاله یک روش تحلیل حساسیت بر پایه «روش طراحی آزمایش چند عاملی کسری دو سطحی» توضیح داده شده است که اثرات اصلی پارامترها و اندرکنشهای آنها را با دقت و سرعت مناسبی نسبت به سایر روشها به دست می دهد. این روش برای تحلیل حساسیت مدل یک گلوگاه آزادراهی در تهران در شبیه ساز ویسیم به کار گرفته شده و تاثیر ۲۶ پارامتر منتخب ویسیم و ۳۲۵ اندرکنش دو طرفه آنها بر ظرفیت جریان مدل و طول صف آن بررسی گردیده است. به اینصورت با اجرای ۱۰۲۴ ترکیب، تعداد ۱۱ اثر اصلی و ۱۳ اندرکنش موثر بر ظرفیت جریان و ۵ اثر اصلی و ۱۰ اندرکنش موثر بر طول صف شناخته شدند که پارامترهای دخیل در آنها می توانند در کالیبراسیون این مدل و مدل‌های مشابه تنظیم گردند.

کلید واژه ها: ترافیک، شبیه سازی، کالیبراسیون، تحلیل حساسیت، طراحی آزمایش، ویسیم.

۱- مقدمه

امروزه ریز شبیه سازهای ترافیک کاربرد وسیعی در مطالعات حمل و نقل یافته اند که از میان این کاربردها می توان به تحلیل شبکه های فوق اشباع یا تحلیل شبکه هایی که قسمتهای مختلف آنها بر عملکرد یکدیگر تاثیر می گذارند، اشاره نمود. این نرم افزارها تسهیلات ترافیک را با استفاده از مدل های رفتار رانندگی شبیه سازی می کنند. مدل های یاد شده تعداد زیادی پارامتر دارای اندرکنش دارند که باید قبل از بکارگیری شبیه ساز کالیبره شوند. روشهای مختلفی برای کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک ارائه شده است که بیشتر آنها به صورت مسئله کمینه سازی اختلاف میان نتایج شبیه سازی و اندازه گیریهای میدانی با یک روش جستجوی ابتکاری هستند. برای مثال پارک و کی (۲۰۰۵)، پارک و ون (۲۰۰۶)، ژنگ و همکاران (۲۰۰۸)، کیم و همکاران (۲۰۰۵) الگوریتم ژنتیک، مننی و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۰۸) الگوریتم تکاملی و هویر و فلندورف (۱۹۹۷) گرم کردن شبیه سازی شده را به کار گرفته اند. به خاطر این که این روشها برای به دست آوردن پاسخ نیاز به اجزای زیادی دارند؛ بهتر است برای دستیابی به پاسخ صحیح در زمان کمتر و با اطمینان بیشتر، فضای جستجوی آنها تا حد ممکن کوچک باشد. از این رو لازم است در فرایند کالیبراسیون فقط بر پارامترهای موثر بر تابع هدف تمرکز شود. برای تعیین این پارامترها باید از روشهای تحلیل حساسیت استفاده کرد. هدف این مقاله ارائه روشی مناسب برای تحلیل حساسیت شبیه سازهای ترافیک است تا به وسیله آن بتوان پارامترهای موثر بر تابع هدف را تعیین نمود و برای بکارگیری نرم افزار، در فرایند کالیبراسیون تنظیم کرد.

ساده ترین روش تحلیل حساسیت، روش یک عامل در زمان است. در این روش تمام عوامل به جز عامل مورد بررسی ثابت نگه داشته می شوند و تغییرات تابع هدف در اثر تغییر عامل یاد شده به عنوان اثر آن منظور می گردد.

در سیستم هایی مانند شبیه سازهای ترافیک که پارامترها اندرکنش^۱ دارند، ممکن است پارامتری اثر اصلی^۲ ناچیزی داشته باشد اما اندرکنش آن با دیگر عوامل زیاد باشد. بنابراین باید از روشهایی استفاده شود که علاوه بر اثرهای اصلی، دست کم همه اندرکنشهای دو طرفه^۳ را به دست دهند. طرحهای چند عاملی تنها راه محاسبه اندرکنشهای عوامل هستند (مونتگومری، ۲۰۱۱).

در روشهای چند عاملی در هر اجرا همه پارامترها طبق طرح آزمایش تعیین مقدار می شوند و مقدار هر اثر اصلی یا اندرکنش با استفاده از نتایج همه اجراها محاسبه می گردد. این خصوصیت امکان محاسبه

^۱ اندرکنش (Interaction) بخشی از تغییر تابع هدف به ازای یک واحد افزایش متغیر که وابسته به مقدار متغیرهای دیگر آزمایش است.

^۲ اثر اصلی (Main effect) بخشی از تغییر تابع هدف به ازای یک واحد افزایش متغیر که مستقل از مقدار متغیرهای دیگر آزمایش است.

^۳ اندرکنش دو عامل

اندرکنشهای عوامل را فراهم می آورد و همچنین باعث می شود که مقدار اثر اصلی هر عامل و اندرکنش چند عامل، از مقدار سایر عوامل آزمایش مستقل باشد.

در روشهای چند عاملی کامل همه ترکیبهای پارامترها اجرا می شوند و در نتیجه همه اثرهای اصلی و اندرکنشها با بیشترین دقت ممکن به دست می آیند. اما در سیستمهایی مانند شبیه سازهای ترافیک که تعداد عوامل زیاد است، آزمایش کامل بسیار پر خرج و یا در زمان قابل قبول غیر ممکن خواهد بود. از این رو رابطه بین دقت و هزینه (مدت آزمایش و . . .) باید مورد توجه قرار گیرد. در این موارد روشهای چند عاملی کسری به کار می روند که اثرهای اصلی همه عوامل و اندرکنشهای با درجه کمتر از حد مشخصی را با دقت کافی و در زمان مناسب به دست می دهند. در این روشها فرض می شود که اندرکنشهای با درجه بالاتر از حد مشخصی اثر ناچیز و قابل صرفنظری بر مقدار تابع هدف دارند^۴. بر این اساس زیر مجموعه ای از ترکیبهای پارامترها آزمایش می شود که با استفاده از نتایج اجرای آن؛ اثرهای اصلی عوامل و اندرکنشهای با درجه کمتر از حد مشخص شده، قابل محاسبه باشند.

از میان روشهای طراحی آزمایش چند عاملی کسری می توان به طرحهای دو سطحی^۵ و سه سطحی^۶ اشاره نمود که در آنها، عوامل به ترتیب در دو و سه سطح بررسی می شوند. از آنجا که طرحهای سه سطحی حتی برای تعداد عوامل کم نیز تعداد اجرای زیادی نیاز خواهند داشت، کمتر مورد استفاده قرار می گیرند (مونتگومری، ۲۰۱۲). طرحهای دو سطحی کامل و کسری باید به عنوان نقطه اتکای آزمایشهای صنعتی برای توسعه، رفع اشکال و بهبود محصول و فرایند قرار گیرند (مونتگومری، ۲۰۱۲). این روشها برای آزمایش غربال که طی آن، عوامل موثر برای بکارگیری در یک فرایند بهینه سازی متمایز می شوند، مناسب هستند (مونتگومری، ۲۰۱۲). روشهای چند عاملی کامل و کسری دو سطحی در اغلب منابع آمار مهندسی و طراحی آزمایش مانند مونتگومری (۲۰۱۲)، مونتگومری و رانگر (۲۰۱۰) و مونتگومری و همکاران (۲۰۱۱) توضیح داده شده اند.

هدف از این مقاله ارائه روش تحلیل حساسیتی برای شبیه سازهای ترافیک، بر پایه روش طراحی آزمایش چند عاملی کسری دو سطحی است، که اثرهای اصلی همه عوامل و اندرکنشهای با درجه کمتر از حد

^۴ این فرض یک فرض تجربی است و نظریه مشخصی که بتواند آن را اثبات نماید، وجود ندارد. برای نمونه لوویبر درباره مدل های خطی می نویسد که اثرهای اصلی ۷۰ تا ۹۰ درصد تغییرات (مجموع مربعات کل) در تابع هدف و اندرکنش های درجه دوم ۵ تا ۱۵ درصد تغییرات و اندرکنش های با درجات بالاتر، باقیمانده تغییرات را توضیح می دهند (لوویبر و همکاران، ۲۰۰۳).

^۵ 2^{k-p} Fractional Factorial Experimental Design

^۶ 3^{k-p} Fractional Factorial Experimental Design

مشخصی را با دقت کافی و در زمان مناسب به دست می دهد. روش یاد شده در قالب اعمال آن بر مدل یک گلوگاه آزاد راهی در تهران در شبیه ساز ویسیم^۷ توضیح داده می شود.

۲- پیشینه پژوهش و مبانی نظری

۲-۱- سابقه تحلیل حساسیت شبیه سازهای ترافیک

با وجود اهمیت مرحله تحلیل حساسیت، این مرحله در بیشتر روشهای ارائه شده برای کالیبراسیون به طور کامل توضیح داده نشده است. همچنین در بعضی موارد روشهای کم دقت مانند یک عامل در زمان و یا روشهای وقتگیر و بعضاً غیر قابل استفاده در شرایط واقعی، مانند آزمایش چند عاملی کامل معرفی شده است. در ادامه منابعی که درباره فرایند تحلیل حساسیت شبیه سازهای ترافیک توضیحی ارائه کرده اند مرور می شوند.

مننی و سان (۲۰۰۸) حساسیت شاخصهای ناهمفزون مانند سرفاصله، نمودار فاصله - سرعت نسبی و شاخصهای همفزون مانند ظرفیت، نمودار سرعت - جریان، نمودار جریان - چگالی و سایر خصوصیات جریان مانند پیشروی موج را نسبت به پارامترهای مدل تعقیب خودروی شبیه ساز ویسیم بررسی کردند. آنها آزمایشهای شاخصهای ناهمفزون را بر مدل یک مسیر دایره ای یک خطه به طول دو مایل و آزمایشهای شاخصهای همفزون را بر یک آزادراه آزمایشی به طول شش مایل شامل دو رمپ ورودی انجام دادند. ایشان درباره روش طراحی آزمایش به طور دقیق توضیح ارائه نکرده اند.

پارک و کی (۲۰۰۵) برای ساخت مدل یک تقاطع هوشمند در شبیه ساز ویسیم، پارامترهای موثر را با توجه به اثر تغییر هر یک از آنها بر زمان سفر و قضاوت مهندسی انتخاب کردند. سپس مجموعه پارامترهای یاد شده را با استفاده از تحلیل واریانس اصلاح نمودند. لازم به یادآوری است که ایشان اندرکنش پارامترها را بررسی نکردند. پارک و اشنیبرگر (۲۰۰۳) از روش مشابهی پارامترهای موثر را انتخاب نمودند و با آنها مدلی خطی و بدون اندرکنش برای بازتولید شاخصهای خروجی ویسیم ساختند.

لونس و ماشمل (۲۰۰۶a) حساسیت ظرفیت مدل ساخته شده در شبیه ساز ویسیم از قطعه ای از یک آزادراه در آمریکا، شامل ۲ رمپ ورودی و ۳ رمپ خروجی را نسبت به پارامترهای مدل تعقیب خودرو و همینطور فاصله محل آغاز تغییر خط از رمپهای خروجی بررسی نمودند. آنها برای این کار از روش یک عامل در زمان استفاده کردند و در این راستا برای به دست آوردن اثر اصلی هر پارامتر، در حالی که سایر پارامترها ثابت بودند مدل را با چهار سطح مختلف آن اجرا نمودند و به منظور تعیین پارامترهای موثر، اختلاف بین

نتایج را با آزمون t کنترل کردند. به رغم اهمیت اندرکنشهای پارامترهای شبیه سازهای ترافیک، به خاطر استفاده از روش یک عامل در زمان امکان برآورد اندرکنشها در این مطالعه وجود نداشت.

لونس و ماشمل (۲۰۰۶b) در ادامه کار قبلی خود، ۶ اندرکنش دو طرفه پارامترهای مدل تعقیب خودروی ویسیم را انتخاب کردند و هر یک را در ۲۵ ترکیب (هر یک از دو پارامتر اندرکنش در ۵ سطح) مورد آزمایش قرار دادند و برای تعیین اندرکنشهای موثر از تحلیل واریانس استفاده نمودند. همانطور که مشخص است، در این مطالعه برای غلبه بر ضعف مطالعه قبلی در برآورد اندرکنشها صرفاً تعداد کمی از اندرکنشهای دو طرفه را انتخاب و مورد آزمایش قرار داده اند.

پونزو و همکاران (۲۰۰۷) برای کالیبراسیون مدل یک قطعه ۱۵ کیلومتری از آزادراهی در ایتالیا در شبیه ساز ترافیک ایمسان، حساسیت ظرفیت جریان مدل را به ۹ پارامتر نرم افزار به وسیله روش طراحی آزمایش چند عاملی کامل سه سطحی، با ۱۹۶۸۳ اجرا طی مدت طولانی ۱۳ روز تعیین کردند. آنها برای محاسبه اثرهای اصلی و اندرکنشها از تحلیل واریانس که در ادامه مقاله توضیح داده خواهد شد استفاده نمودند.

کوربان (۲۰۰۰) برای کالیبراسیون مدل قطعه ای از یک آزادراه در آمریکا به طول حدود ۶ مایل در شبیه ساز MITSIM؛ حساسیت سه شاخص جریان، سرعت و چگالی را به ۸ پارامتر مدل تعقیب خودرو و اندرکنشهای دو طرفه آنها با روش چند عاملی کسری دو سطحی بررسی کرد و برای تعیین پارامترهای موثر، از تحلیل واریانس استفاده نمود. تابع هدف این آزمایش، مجموع مربعات اختلاف اندازه گیری میدانی و نتیجه شبیه سازی در کل زمان شبیه سازی و در طول آزادراه بود. اگرچه کوربان نتایج این تحلیل حساسیت را در فرایند کالیبراسیون مدل به کار برده است؛ اما به دلیل تغییر جریان ورودی طی زمان، تفکیک نکردن قسمتهای مختلف آزادراه و وابسته بودن تابع هدف به اندازه گیریهای میدانی، امکان درک و تحلیل آنها وجود ندارد.

۲-۲- مدل های پایه رفتار رانندگی شبیه ساز ترافیک ویسیم

ویسیم یکی از شناخته شده ترین ریزشبه سازهای ترافیک است که توسط همکاری موسسه فناوری کارلسروهه و شرکت پی تی وی^۸ آلمان از سال ۱۹۹۴ تولید شده است. این نرم افزار بر پایه مدل‌های روانی-جسمانی تعقیب خودرو^۹ و تغییر خط^{۱۰} طراحی شده است و در نتیجه از آستانه های درک برای شبیه سازی رفتار رانندگی استفاده می نماید. با استفاده از ویدمان و ریتر (۱۹۹۱) و دستور کار نرم افزار (پی تی وی،

^۸ PTV Group

^۹ Car following

^{۱۰} Lane changing

۲۰۱۰)، مدل‌های یاد شده در ادامه به اختصار توضیح داده شده اند. هدف از این کار، صرفاً آشنایی مقدماتی با پارامترهای مورد آزمایش است.

مدل تعقیب خودرو

مدل تعقیب خودروی شبیه ساز ویسیم بر مبنای مدل تعقیب خودروی ویدمان^{۱۱} است که دو بیان متفاوت از آن در این نرم افزار ارائه شده است: ویدمان ۱۹۷۴ برای مدل سازی شرایط شهری و ویدمان ۱۹۹۹ برای مدل سازی شرایط آزادراهی. در مدل ویدمان، بر اساس پارامترها آستانه های درکی مشخص می شوند که چهار وضعیت متفاوت رانندگی را تعریف می کنند. وضعیتهای یاد شده با یک مثال به اختصار معرفی شده اند. خودرویی که با فاصله زیاد از سایر خودروها حرکت می کند و تاثیری از آنها نمی پذیرد، در وضعیت رانندگی آزاد^{۱۲} است. در این وضعیت راننده سعی می کند با اعمال شتاب افزایشده، به بیشینه سرعت دلخواه برسد. به محض اینکه راننده این خودرو احساس می کند که در حال نزدیک شدن به یک خودروی کندتر در جلو است، به وضعیت نزدیک شدن^{۱۳} وارد می شود. وی در این وضعیت طوری شتاب کاهنده اعمال می کند که در فاصله مشخصی از خودروی جلویی با آن هم سرعت شود. در این وضعیت که تعقیب نام دارد، خودروی جلویی را بدون اعمال شتاب کاهنده یا افزایشده زیاد دنبال می کند. زمانی که در اثر ترمز کردن خودروی جلویی، فاصله اش با آن کمتر از فاصله ایمن دلخواه شود؛ به وضعیت ترمز کردن^{۱۴} می رود. در این وضعیت راننده برای جلوگیری از برخورد، شتاب کاهنده با نرخ متوسط تا زیاد اعمال می کند. معادلات شتاب چهار وضعیت یاد شده نیز تابعی از پارامترهای مدل هستند.

مدل ویدمان ۹۹ که در این مقاله بررسی می شود، بیش از ۱۰ پارامتر رفتار رانندگی قابل تنظیم دارد که در ادامه به اختصار معرفی می شوند. پارامتر CC0 با واحد متر، فاصله دلخواه سپر به سپر در حالت توقف را تعریف می کند که راننده تمایل به حفظ آن با خودروی جلویی دارد. پارامتر CC1 با واحد ثانیه، فاصله زمانی را تعریف می کند که راننده تمایل به حفظ آن با خودروی جلویی دارد. در این مدل فاصله ایمن دلخواه از جمع CC0 با ضرب CC1 در سرعت (متر بر ثانیه) تعیین می شود. پارامتر CC2 با واحد متر، نوسان فاصله طولی در وضعیت تعقیب را محدود می کند. پارامتر CC3 با واحد ثانیه، فاصله زمانی با قرارگیری در حالت تعقیب است که در آن وضعیت نزدیک شدن (کاهش سرعت) شروع می شود. پارامترهای CC4 و CC5 با واحد متر بر ثانیه، حدود نوسان سرعت نسبی در وضعیت تعقیب را به ترتیب در شرایط نزدیک و دور شدن تعریف می کنند. پارامتر CC6 تاثیر فاصله را بر حدود نوسان سرعت در وضعیت تعقیب

Wiedemann^{۱۱}

Free Driving^{۱۲}

Approaching^{۱۳}

Braking^{۱۴}

تعریف می‌کند و زیاد کردن آن باعث افزایش محدوده نوسان سرعت با ازدیاد فاصله می‌شود. پارامتر CC7 مقدار واقعی شتاب در وضعیت تعقیب است. پارامترهای CC8 و CC9 بیشینه شتاب دلخواه به ترتیب در سرعت‌های صفر و ۸۰ کیلومتر بر ساعت هستند.

اضافه بر پارامترهای یاد شده، «بیشینه دید در جلو»^{۱۵} بیشینه فاصله در جلو را که توسط راننده بررسی می‌شود تعیین می‌کند. پارامتر «تعداد خودروهای مورد مشاهده»^{۱۶} بیشینه تعداد خودروهایی را که در این فاصله بررسی می‌شوند مشخص می‌نماید. «کمینه دید در جلو»^{۱۷} فاصله ای را تعریف می‌کند که مستقل از پارامتر یاد شده قبلی، همه خودروهای درون آن توسط راننده بررسی می‌گردد. پارامترهای «بیشینه دید در عقب»^{۱۸} و «کمینه دید در عقب»^{۱۹} نیز عملکردی مانند بیشینه دید در جلو و کمینه دید در جلو برای پشت خودرو دارند.

مدل تغییر خط

مدل تغییر خط شبیه ساز ویسیم بر اساس تلاش‌های ویلمان^{۲۰} و اسپارمان^{۲۱} در سال ۱۹۷۸ طراحی شده است (ویدمان و ریتر، ۱۹۹۱). در ویسیم دو نوع تغییر خط انجام می‌شود: ضروری^{۲۲} برای ادامه دادن مسیر یا به بیان دیگر رفتن به خطوط عبوری که به ادامه مسیر متصل هستند و آزاد^{۲۳} برای بدست آوردن فضا یا سرعت بیشتر. برای شروع تغییر خط، فاصله کمینه ای به اندازه «سرفاصله کمینه»^{۲۴} باید در جلو وجود داشته باشد. در طی تغییر خط «ضریب کاهش فاصله ایمن»^{۲۵} به عنوان ضریب کاهش فاصله ایمن اعمال می‌شود.

به منظور همکاری در تغییر خط، خودروی عقب در خط هدف برای ایجاد فاصله خالی مورد نیاز، ترمز می‌گیرد. این کار در صورتی انجام می‌شود که شتاب کاهش لازم، کمتر از «شتاب کاهشده بیشینه برای همکاری»^{۲۶} باشد. در گونه دیگری از همکاری به نام «تغییر خط با همکاری»^{۲۷} که اعمال آن به اختیار کاربر

^{۱۵} Maximum look ahead distance

^{۱۶} Number of observed vehicles

^{۱۷} Minimum look ahead distance

^{۱۸} Maximum look back distance

^{۱۹} Minimum look back distance

^{۲۰} Willmann

^{۲۱} Sparmann

^{۲۲} Necessary (Mandatory)

^{۲۳} Free

^{۲۴} Minimum headway

^{۲۵} Safety distance reduction factor

^{۲۶} Maximum deceleration for cooperative braking

است، خودروی عقبی در خط هدف به منظور ایجاد فضای خالی، تغییر خط می دهد. اگر سرعت خودروی تغییر خط دهنده بیش از «اختلاف سرعت بیشینه»^{۲۸} از سرعت وی بیشتر باشد و یا با افزایش سرعت نسبی خودروی تغییر خط دهنده^{۲۹} تا سقف اختلاف سرعت بیشینه، زمان برخورد آنها از «زمان برخورد بیشینه»^{۳۰} بیشتر شود؛ این همکاری انجام نمی گردد.

در تغییر خطهای ضروری، سطح پرخاشگری^{۳۱} از طریق تعریف محدوده ترمز با پارامترهای «شتاب کاهنده بیشینه»^{۳۲} و «شتاب کاهنده قابل قبول (کمینه)»^{۳۳} و همچنین نرخ کاهش شتاب به صورت «فاصله نظیر کاهش شتاب به اندازه یک متر بر مربع ثانیه»^{۳۴}؛ برای خودروی تغییر خط دهنده و خودروی عقبی در خط هدف تعیین می گردد. خودروی خواستار تغییر خط ضروری، از «فاصله (محل) آغاز تغییر خط»^{۳۵} تا «فاصله (محل) توقف اضطراری»^{۳۶} برای یافتن فاصله خالی مناسب، شرایط خط کناری را بررسی می کند. فاصله خالی یاد شده، تابعی از شتاب کاهنده اعمال شونده است. این شتاب در فاصله (محل) توقف اضطراری، بیشینه است و در محدوده قبل از آن تا فاصله (محل) آغاز تغییر خط، طبق نرخ کاهش شتاب از مقدار بیشینه تا مقدار قابل قبول (کمینه) کاهش می یابد. خودرویی که نتواند فرایند تغییر خط ضروری را کامل کند و به فاصله توقف اضطراری برسد، در آن جا متوقف و منتظر فاصله مناسب می ماند و در صورت عدم دستیابی به فاصله، پس از سپری شدن «زمان انتظار قبل از حذف»^{۳۷} از شبکه شبیه سازی حذف می شود.

۳- روش شناسی تحقیق

در این قسمت روش تحلیل حساسیت بر پایه روش طراحی آزمایش چند عاملی کسری دو سطحی، با بکارگیری آن بر مدل قسمتی از آزادراه نیایش تهران توضیح داده می شود.

۳-۱- محل مورد مطالعه و داده ها

Cooperative lane change	^{۲۷}
Maximum speed difference	^{۲۸}
سرعت نسبت به خودروی عقبی در خط هدف	^{۲۹}
Maximum collision time	^{۳۰}
Aggressiveness	^{۳۱}
Maximum deceleration	^{۳۲}
Accepted (minimum) deceleration	^{۳۳}
Meters per 1 m/s ²	^{۳۴}
Lane change distance	^{۳۵}
Emergency stop distance	^{۳۶}
Waiting time before diffusion	^{۳۷}

محل مورد مطالعه قطعه ای تقریباً یک کیلومتری از آزادراه نیایش شرق بین تقاطع با خیابان سعادت آباد و تقاطع با آزادراه چمران است که در انتهای آن، آزادراه از چهار خطه به سه خطه تبدیل می شود (شکل ۱). داده های هندسی محل از طریق عکس هوایی و برداشت میدانی به دست آمد. توزیع سرعت جریان آزاد نیز از داده های دوربین سرعت سنج واقع در آزادراه در مقطع ورودی خیابان سعادت آباد استخراج شد. برای به دست آوردن این توزیع، داده های ساعت ۰۵:۳۰ تا ۰۶:۱۵ صبح یک روز کاری که سطح خدمت معبر A و هوا روشن بود استفاده گردید. توزیع سرعت جریان آزاد به صورت نرمال با میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۸۳ و ۱۲ کیلومتر بر ساعت به دست آمد. جریان ورودی به محل از ساعت ۰۶:۰۰ تا ۰۹:۰۰ صبح یک روز کاری، فیلمبرداری و در بازه های ۱۵ دقیقه ای شمارش شد. بیشترین نرخ جریان ۱۵ دقیقه ای برابر ۸۳۰۰ خودرو بر ساعت بود که در آزمایش به عنوان جریان ورودی به مدل داده شد.

جریان خروجی با واحد خودرو بر ساعت و طول صف متوسط با واحد متر، برای یک بازه زمانی ۱۵ دقیقه ای (بعد از زمان گرم کردن شبیه سازی) به عنوان تابع هدف بررسی می شوند.



شکل ۱ آزادراه نیایش تهران در محل تقاطع با آزادراه چمران

۳-۲- روش طراحی آزمایش

برای تحلیل حساسیت تابعهای هدف، تعداد ۲۶ پارامتر شبیه ساز ویسیم انتخاب و حدود بالا و پایین آنها تعیین شدند (جدول ۱). از آنجا که با این تعداد پارامتر، آزمایش چند عاملی کامل دو سطحی شامل $2^{(26)} = 67108864$ ترکیب و در زمان مناسب قابل اجرا نبود؛ آزمایش چند عاملی کسری با رزولوشن (دقت) ۵ طراحی گردید که با اجرای $1024 = 2^{(26-16)}$ ترکیب، تخمین مناسبی از اثرهای اصلی و اندرکنشهای دو طرفه به دست می دهد. فرایند طراحی آزمایش و مفاهیم مربوط، از جمله رزولوشن، در مثال زیر توضیح داده شده است.

اگر تحلیل حساسیت یک تابع نسبت به سه عامل ۰، ۱ و ۲ در دو سطح مورد نظر باشد و فقط اجرای نیمی از $2^{(3)} = 8$ ترکیب عوامل یاد شده ممکن باشد، از آزمایش کسری با $4 = 2^{(3-1)}$ ترکیب استفاده می گردد.

برای طراحی این آزمایش که در جدول ۲ نشان داده شده است، دو عامل دلخواه مثلا ۰ و ۱ به عنوان عوامل اصلی انتخاب می گردند و یک آزمایش دو عاملی کامل با آنها طرح می شود یا به بیان ساده تر همه ترکیبهای آنها ردیف به ردیف در طرح آزمایش نوشته می شود. علائم ستونهای ۰ و ۱ به این صورت تعیین شده اند. سپس فرض می گردد که اندرکنش ۰ و ۱ که با $1*0$ نشان داده می شود، اثر کم و قابل صرفنظری در مقایسه با عامل ۲ دارد و در طرح آزمایش کسری علائم ستون ۲ برابر حاصلضرب علائم ستونهای ۰ و ۱ قرار داده می شود تا با نتایج اجرای چهار ترکیب حاصل و بر مبنای فرض یاد شده، اثر اصلی هر سه عامل محاسبه گردد. فرض یاد شده با $I=0*1*2$ نشان داده می شود که رابطه معرف نام دارد.

در آزمایشهایی که تعداد عوامل زیاد است و نسبت کوچکتری از آزمایش کامل برای آزمایش کسری مد نظر قرار می گیرد، فرضها و رابطه های معرف بیشتری مورد نیاز می باشد. به دلیل پیچیدگی فرایند تعیین این فرضها و روابط، طراحی آزمایشهای کسری با رایانه انجام می گیرد. در آزمایش تحلیل حساسیت این مقاله، عوامل ۰ تا ۹ (جدول ۱) به عنوان عوامل اصلی انتخاب شدند و یک آزمایش ده عاملی کامل با آنها طراحی گردید. سپس برای تکمیل طرح آزمایش چند عاملی کسری، باقی عوامل از شماره ۱۰ تا ۲۵ (جدول ۱) با استفاده از روابط معرف جدول ۳ تعیین مقدار شدند. در هر آزمایش کمترین تعداد عوامل سمت راست رابطه های معرف، رزولوشن آزمایش نامیده می شود که معیاری از دقت نتایج است. در مثال بالا رزولوشن آزمایش برابر ۳ است و در نتیجه تخمین قابل اطمینانی از اثرهای اصلی عوامل به دست می دهد. رزولوشن آزمایش این مقاله برابر ۵ است و در نتیجه تخمین قابل اطمینانی از اثرهای اصلی و اندرکنشهای دو طرفه به دست می دهد. برای اطلاعات بیشتر می توانید به مونتهگومری (۲۰۱۲) رجوع کنید.

جدول ۱ پارامترهای آزمایش

شماره	پارامتر	حد پایین	حد بالا	شماره	پارامتر	حد پایین	حد بالا
۰	Maximum deceleration (own)	-۴,۵	-۳,۵	۱۳	Min headway	۰,۵	۱,۰
۱	Accepted deceleration (own)	-۱,۵	-۰,۵	۱۴	Max deceleration for cooperative braking	-۴,۰	-۳,۰
۲	Reduction rate (own) (meters per 1 m/s ²)	۱۵۰	۲۵۰	۱۵	No. of observed vehicles	۲	۴
۳	Maximum deceleration (trailing)	-۳,۵	-۲,۵	۱۶	Maximum look ahead distance	۱۰۰	۲۰۰
۴	Accepted deceleration (trailing)	-۱,۵	-۰,۵	۱۷	Maximum look back distance	۵۰	۱۵۰
۵	Reduction rate (trailing) (meters per 1 m/s ²)	۱۵۰	۲۵۰	۱۸	CC1	۰,۷	۰,۹
۶	Lane change distance	۱۵۰	۲۰۰	۱۹	CC2	۴	۶
۷	Safety distance reduction factor	۰,۴	۰,۶	۲۰	CC3	-۱۰	-۸
۸	Waiting time before diffusion	۱۰	۲۰	۲۱	CC4	-۰,۷	-۰,۳۵
۹	Simulation resolution	۶	۸	۲۲	CC5	۰,۳۵	۰,۷
۱۰	Cooperative lane change	۰	۱	۲۳	CC6	۱۱,۴۴	۱۴,۴۴

۱۱	Maximum speed difference	۳,۰	۵,۰	۲۴	CC8	۲,۵	۳,۵
۱۲	Maximum collision time	۸,۰	۱۰,۰	۲۵	CC9	۱,۰	۲,۰

جدول ۲ طراحی آزمایش چند عاملی کسری $2^{(3-1)}$ نمونه

ترکیبها	۰	۱	۲	۰*۱	۰*۲	۱*۲
(a)	-	-	+	+	-	-
(b)	+	-	-	-	-	+
(c)	-	+	-	-	+	-
(d)	+	+	+	+	+	+

در ستونهای عوامل، علائم مثبت و منفی بیانگر سطوح بالا و پایین عوامل است و در ستونهای اندرکنشها این علائم از ضرب ستونهای عوامل آنها به دست آمده است

جدول ۳ روابط معرف آزمایش طراحی شده

روابط معرف		روابط معرف			
I	=	0*1*2*3*4*5*6*7*8*9*10	I	=	0*1*2*3*7*8*9*18
I	=	3*4*5*6*7*8*9*11	I	=	0*1*4*5*6*8*9*19
I	=	1*2*5*6*7*8*9*12	I	=	0*2*5*6*8*9*20
I	=	0*2*4*6*7*8*9*13	I	=	2*3*4*6*8*9*21
I	=	1*3*6*7*8*9*14	I	=	1*2*3*4*5*8*9*22
I	=	2*4*5*7*8*9*15	I	=	1*4*5*6*7*9*23
I	=	0*3*5*7*8*9*16	I	=	0*5*6*7*9*24
I	=	0*1*4*7*8*9*17	I	=	0*3*4*6*7*9*25

اعداد جدول به عوامل نظیر آنها در جدول ۱ اشاره دارد

۳-۳- روش تحلیل نتایج آزمایش

پس از اجرای آزمایش، نتایج به دو روش تحلیل گردیدند که در ادامه تشریح شده اند.

روش آزمون t : خطای استاندارد از آزمایش رابطه ۱ محاسبه شد (جدول ۴) که در آن SE خطای استاندارد، σ^2 واریانس نتایج، Runs تعداد ترکیبهای مورد آزمایش (در اینجا ۱۰۲۴) و n تعداد تکرارهای هر ترکیب است که به خاطر حالت اتفاقی نتایج اجراها انجام می شود (در اینجا برای آزمایش ظرفیت جریان ۶ و برای آزمایش طول صف ۵). مقدار تخمینی σ^2 از رابطه ۲ محاسبه شد که تعداد درجات آزادی آن برابر با $Runs(n-1)$ است. در این رابطه f_{jk} مقدار تابع هدف در تکرار k از ترکیب j است، $Total$ حاصل جمع مقدار تابع هدف در تکرارهای ترکیب j و سایر پارامترها مطابق تعاریف قبلی هستند.

$$SE = \left(\frac{4\sigma^2}{Runs * n} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \sum_{j=1}^{Runs} \left[\sum_{k=1}^n \frac{\left(f_{jk} - \frac{Total_j}{n} \right)^2}{(n-1)} \right] / Runs \quad (2)$$

اثر هر عامل یا اندرکنش i از رابطه ۳ محاسبه شد که در آن $Effect_i$ اثر عامل یا اندرکنش i است و مقدار $Contrast_i$ از رابطه ۴ به دست می آید. در این رابطه $Sign_{ji}$ علامت ستون عامل یا اندرکنش i در ترکیب j از جدول طراحی آزمایش است و سایر پارامترها مطابق تعاریف قبلی هستند.

$$Effect_i = \frac{Contrast_i}{0.5 * (Runs * n)} \quad (3)$$

$$Contrast_i = \sum_{j=1}^{Runs} Total_j * Sign_{ji} \quad (4)$$

برای هر عامل یا اندرکنش i آماره t_{0i} از تقسیم $Effect_i$ (رابطه ۳) بر SE (رابطه ۱) به دست آمد. عامل یا اندرکنش i با $(1 - \alpha) * 100$ درصد اطمینان موثر خوانده شد اگر t_{0i} بزرگتر از $t_{\alpha, Runs * (n-1)}$ (جدول ۴) بود. شاخص t ratio که معیاری از میزان تاثیرگذاری است، از تقسیم t_{0i} بر $t_{\alpha, Runs * (n-1)}$ محاسبه گردید. برای اطلاعات بیشتر می توانید به مونتگومری و همکاران (۲۰۱۱) مراجعه نمایید.

روش آزمون تحلیل واریانس^{۳۸}: کل تغییرات نتایج با استفاده از رابطه ۵ به دست آمد (جدول ۴) که درجات آزادی نظیر آن برابر $Runs * n - 1$ است. در این رابطه SS_T کل تغییرات یا مجموع مربعات کل، I شمارنده و سایر پارامترها مانند تعاریف قبلی هستند.

$$SS_T = \sum_{j=1}^{Runs} \sum_{k=1}^n \left(f_{jk} - \frac{\sum_{l=1}^{Runs} Total_l}{Runs * n} \right)^2 \quad (5)$$

بخشی از مجموع مربعات کل که مربوط به هر اثر اصلی یا اندرکنش i بود از رابطه ۶ محاسبه شد که درجات آزادی نظیر آن برابر با تعداد حالت‌های مختلف عامل یا اندرکنش i (برای اثرهای اصلی تعداد سطوح و برای اندرکنشها تعداد ترکیب‌های ممکن) منهای یک است. در طرح‌های دو سطحی این تعداد برای اثرات اصلی و اندرکنشها برابر یک می باشد. در این رابطه SS_i مجموع مربعات نظیر عامل یا اندرکنش i است و سایر پارامترها مطابق تعاریف قبلی هستند. با استفاده از این رابطه، حاصل جمع مجموع مربعات اثرهای اصلی عوامل و اندرکنش‌های دو طرفه آنها محاسبه شد (جدول ۴).

$$SS_i = \frac{(Contrast_i)^2}{Runs * n} \quad (6)$$

بخشی از کل تغییرات نتایج که مربوط به اثرهای اصلی یا اندرکنشهای محاسبه شده نبود و مجموع مربعات خطا نام دارد، از رابطه ۷ تعیین شد (جدول ۴) که در آن SS_E مجموع مربعات خطا و i شماره اثر اصلی یا اندرکنش است و سایر پارامترها مطابق تعاریف قبلی هستند. تعداد درجات آزادی نظیر مجموع مربعات خطا که درجات آزادی خطا^{۳۹} نامیده می شود، از کم کردن مجموع درجات آزادی نظیر SS_i ها از درجات آزادی کل به دست آمد.

$$SS_E = SS_T - \sum_i SS_i \quad (7)$$

میانگین مربعات عامل یا اندرکنش i که با MS_i نمایش داده می شود، از تقسیم SS_i (رابطه ۶) بر درجات آزادی نظیر آن و میانگین مربعات خطا که با MS_E نمایش داده می شود، از تقسیم SS_E (رابطه ۷) بر درجات آزادی خطا محاسبه شد. برای هر عامل یا اندرکنش i آماره f_{0i} از تقسیم MS_i بر MS_E به دست آمد. عامل یا اندرکنش i با $(1 - \alpha) \cdot 100$ درصد اطمینان موثر خوانده شد، اگر f_{0i} بزرگتر از $f_{\alpha, SS_i \text{ DOF}, \text{ Error DOF}}$ (جدول ۴) بود. شاخص F ratio که معیاری از میزان تاثیرگذاری است، از تقسیم f_{0i} بر $f_{\alpha, SS_i \text{ DOF}, \text{ Error DOF}}$ محاسبه گردید. برای اطلاعات بیشتر می توانید به مونتگومری و رانگر (۲۰۱۰) رجوع کنید.

جدول ۴ مقادیر محاسبه شده برای تحلیل نتایج

روش	عنوان	تابع هدف	
		ظرفیت جریان	طول صف
آزمون t	خطای استاندارد (رابطه ۱)	۵,۷۴۶	۱,۸۰۸
	$t_{\alpha, \text{Runs} \cdot (n-1)}$	$t_{0.01, 5120} = ۲,۳۲۶$	$t_{0.01, 4096} = ۲,۳۲۶$
آزمون تحلیل واریانس	مجموع مربعات کل (رابطه ۵)	۵۴۶۸۰۶۴۷۲	۳۱۴۹۵۸۹۵
	جمع مجموع مربعات عوامل و اندرکنش های محاسبه شده	۴۸۶۱۸۳۶۵۶	۱۱۵۳۴۷۲۲
	مجموع مربعات خطا (رابطه ۷)	۶۰۶۲۲۸۱۶	۱۹۹۶۱۱۷۳
	$f_{\alpha, SS_i \text{ DOF}, \text{ Error DOF}}$	$F_{0.01, 1, 5792} = ۶,۶۳$	$F_{0.01, 1, 4768} = ۶,۶۳$

۴- یافته های تحقیق

در نتیجه تحلیل حساسیت، از ۲۶ اثر اصلی و ۳۲۵ اندرکنش دو طرفه، با تحلیل واریانس ۱۴ اثر اصلی و ۳۵ اندرکنش و با آزمون t تعداد ۱۱ اثر اصلی و ۱۳ اندرکنش موثر بر ظرفیت جریان شناخته شدند. همچنین با تحلیل واریانس ۱۱ اثر اصلی و ۱۵ اندرکنش و با آزمون t تعداد ۵ اثر اصلی و ۱۰ اندرکنش بر طول صف شناخته شدند.

^{۳۹} Error degrees of freedom

از آن جا که تعداد عوامل و اندرکنشهای موثر شناخته شده از طریق آزمون t کمتر از تحلیل واریانس است، می توان نتیجه گرفت که این آزمون فضای جستجو را بیشتر یا سختگیرانه تر کاهش می دهد. از این رو اثرهای اصلی و اندرکنشهایی که با آزمون t موثر شناخته شده اند، به ترتیب مقدار تاثیر در جدول ۵ آمده اند. با بررسی پارامترهای دخیل در اثرهای اصلی و اندرکنشهای موثر، مشخص شد از ۲۶ پارامتری که آزمایش شدند؛ تعداد ۱۴ پارامتر در کالیبراسیون ظرفیت جریان و همین تعداد نیز در کالیبراسیون طول صف این مدل و مدل‌های مشابه می توانند تنظیم شوند که اسامی آنها نیز در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ اثرهای اصلی و اندرکنشهای موثر شناخته شده با آزمون t

ظرفیت جریان			طول صف		
اثر اصلی یا اندرکنش	t ratio	نام پارامترهای دخیل (غیر تکراری)	اثر اصلی یا اندرکنش	t ratio	نام پارامترهای دخیل (غیر تکراری)
۱۹	۷۱,۹۸۳	CC2	۱۹	۳۱,۱۷۶	CC2
۱۸	۵۱,۷۷۰	CC1	۸	۱۱,۲۴۴	Waiting time before diffusion
۱۴	۲۲,۲۵۴	Max deceleration for cooperative braking	۱۵	۶,۸۸۹	No. of observed vehicles
۹	۱۶,۹۹۳	Simulation resolution	۲۲	۶,۶۱۴	CC5
۱۵	۱۵,۴۴۸	No. of observed vehicles	۱۸	۶,۵۴۴	CC1
۲۲	۱۱,۵۳۴	CC5	۱۰*۱۵	۴,۰۷۷	Cooperative lane change* No. of observed vehicles
۶	۷,۹۷۴	Lane change distance	۱۵*۱۹	۳,۹۹۶	No. of observed vehicles* CC2
۱۴*۱۵	۷,۴۷۲	Max deceleration for cooperative braking*No. of observed vehicles	۸*۱۴	۳,۸۸۴	Waiting time before diffusion*Max deceleration for cooperative braking
۱۵*۱۹	۶,۶۸۱	No. of observed vehicles* CC2	۹*۱۹	۳,۵۱۹	Simulation resolution* CC2
۴*۱۰	۶,۴۰۹	Accepted deceleration (trailing)* Cooperative lane change	۰*۱۷	۳,۴۶۴	Maximum deceleration (own)* Maximum look back distance
۱۸*۱۹	۶,۳۹۹	CC1* CC2	۱۵*۱۸	۳,۳۰۹	No. of observed vehicles* CC1
۴	۶,۰۸۹	Accepted deceleration (trailing)	۱۰*۱۸	۲,۷۰۶	Cooperative lane change * CC1
۱۵*۱۸	۵,۵۴۱	No. of observed vehicles* CC1	۳*۱۸	۲,۶۵۹	Maximum deceleration (trailing)* CC1
۳	۴,۴۱۴	Maximum deceleration (trailing)	۶*۲۳	۲,۴۶۹	Lane change distance* CC6
۱۰*۱۵	۴,۱۱۴	Cooperative lane change* No. of observed vehicles	۷*۸	۲,۳۲۹	Safety distance reduction factor* Waiting time before diffusion
۱۰*۱۸	۴,۰۱۸	Cooperative lane change* CC1			
۷*۱۰	۳,۸۹۶	Safety distance reduction factor* Cooperative lane change			
۱۶	۳,۸۲۱	Maximum look ahead distance			
۷*۱۴	۳,۲۱۰	Safety distance reduction factor* Max deceleration for cooperative braking			
۱۳	۲,۸۲۲	Min headway			

۳*۱۵	۲,۴۹۱	Maximum deceleration (trailing)* No. of observed vehicles
۴*۱۵	۲,۴۲۳	Accepted deceleration (trailing)* No. of observed vehicles
۱۴*۱۹	۲,۳۸۶	Max deceleration for cooperative braking* CC2
۹*۲۳	۲,۳۴۷	Simulation resolution*CC6

اعداد ستونهای «اثر اصلی یا اندرکنش» بیانگر عوامل نظیر آنها در جدول ۱ هستند

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله یک روش تحلیل حساسیت، بر مبنای روش طراحی آزمایش چند عاملی کسری دو سطحی معرفی شد که مقدار اثرهای اصلی و اندرکنشهای کمتر از درجه مشخصی را با دقت کافی و در زمان قابل قبول به دست می دهد.

این روش بر مدل یک گلوگاه آزادراهی در شبیه ساز ترافیک ویسیم اعمال و اثرگذاری پارامترها و اندرکنشهای آنها بر ظرفیت جریان و طول صف بررسی شد. با این روش، اثر اصلی و اندرکنشهای دو طرفه ۲۶ پارامتر ویسیم با اجرای ۱۰۲۴ ترکیب به دست آمد. این در حالی است که روش چند عاملی کامل دو سطحی برای تعیین اثرهای اصلی و اندرکنشهای این پارامترها نیازمند اجرای ۶۷۱۰۸۸۶۴ ترکیب است.

در نتیجه تحلیل حساسیت، از ۲۶ اثر اصلی و ۳۲۵ اندرکنش دو طرفه، با آزمون t تعداد ۱۱ اثر اصلی و ۱۳ اندرکنش موثر بر جریان و ۵ اثر اصلی و ۱۰ اندرکنش موثر بر طول صف شناخته شدند. تعداد زیاد اندرکنشهای موثر این آزمایش، بیانگر اهمیت آنها در تحلیل حساسیت است.

با بررسی پارامترهای دخیل در اثرهای اصلی و اندرکنشهای موثر، مشخص شد تعداد ۱۴ پارامتر در کالیبراسیون ظرفیت جریان و همین تعداد نیز در کالیبراسیون طول صف این مدل و مدلهای مشابه می توانند تنظیم شوند. در نتیجه با این روش فضای جستجوی مسئله کالیبراسیون با هر کدام از توابع هدف ظرفیت جریان و یا طول صف، از ۲۶ پارامتر به ۱۴ پارامتر کاهش یافت که می تواند تاثیر بسزایی در کاهش زمان حل و افزایش قابلیت اطمینان پاسخ داشته باشد.

در راستای دستیابی به اطلاعات مناسبتر از طریق تحلیل حساسیت شبیه سازهای ترافیک توصیه می شود:

- طراحی آزمایش علاوه بر اثرهای اصلی، دست کم همه اندرکنشهای دو طرفه را به دست دهد.

- آزمایش روی هر نوع تسهیل ترافیکی یا حتی قسمتهای متفاوت تسهیل، به طور جداگانه انجام شود تا نتایج قابل درک و تحلیل باشد و همچنین از تاثیرگذاری قسمتهای مختلف بر یکدیگر جلوگیری شود. برای نمونه محدوده همگرایی یک آزادراه، جدای از سایر محدوده های آن بررسی شود.
 - جریان ورودی در آزمایش ثابت باشد تا تاثیر پارامترها در یک چگالی مشخص به دست آید.
 - تابع هدف آزمایش مستقل از اندازه گیریهای میدانی و صرفا تابع نتایج شبیه سازی باشد تا حساسیت شاخصهای ترافیکی مدل، مانند ظرفیت جریان، نسبت به پارامترها به دست آید.
 - پارامترها فقط در محدوده منطقی و امکانپذیر فیزیکی آزمایش شوند.
 - برای تحلیل حساسیت با استفاده از نتایج آزمایش، از آزمون t به جای تحلیل واریانس استفاده شود. این آزمون اثرهای اصلی و اندرکنشهای کمتری را موثر معرفی می کند.
- برای انجام کالیبراسیون پیشنهاد می شود پارامترهای با تاثیر بیشتر در مرحله اول کالیبراسیون و پارامترهای موثر اما با تاثیر کمتر در مرحله بعد و برای تدقیق مدل تنظیم گردند. همچنین پیشنهاد می شود پارامترهای موثرتر در تعداد سطوح بیشتری نسبت به پارامترهای کم تاثیرتر مورد جستجو قرار گیرند.
- به منظور انجام مطالعات آینده پیشنهاد می شود آزمایش تحلیل حساسیت با روش معرفی شده، بر مدل انواع تسهیلات ترافیکی و با سطوح متفاوت جریان انجام شود تا بتوان از نتایج آن در کالیبراسیون مدلهای استفاده نمود.

قدردانی

بدینوسیله از آقای مهندس یوسف ساجدی، کارشناس آزمایشگاه ترافیک دانشگاه علم و صنعت ایران، برای طراحی روابط معرف آزمایش تشکر می گردد.

منابع

- Hoyer, R., and Fellendorf, M., (1997), *Parameterization of microscopic Traffic Flow Models through Image Processing*, 8th IFAC Symposium on Transport, Chania, Crete.
- Kim, S., Kim W., and Rillet, L. (2005), *Calibration of micro-simulation models using non-parametric statistical techniques*, Transportation Research Record, Vol. 1935, pp: 111-119.
- Kurian, M., (2000), *Calibration of microscopic traffic simulator*, MIT M.Sc. Thesis, Massachusetts.
- Louviere, J. J., Hensher, D. A. and Swait, J. D., (2003), *Stated choice methods analysis and application*, Cambridge University Press, New York.

- Lownes, N.E. and Machemehl, R., (2006a), *Sensitivity of simulated capacity to VISSIM driver behavior parameter modification*, Transportation Research Record, No. 1988, pp.102-110.
- Lownes, N.E. and Machemehl, R., (2006b), *VISSIM: a multi-parameter sensitivity analysis*, Proceedings of the winter simulation conference, California, USA.
- Menneni, S. and Sun, C., (2008), *Analysis of Wiedemann 74 and 99 driver behavior parameters*, University of Missouri Columbia, Columbia, USA.
- Menneni, S., Sun, C., and Vortisch, P., (2009), *An integrated microscopic and macroscopic calibration for psycho-physical car following models*, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., USA.
- Menneni, S., Sun, C., and Vortisch, P., (2008), *Micro simulation calibration using speed flow relationships*, Transportation Research Record Vol. 2088, pp: 1-9.
- Montgomery, D. C., (2012), *Design and analysis of experiments 8th ed*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. C., (2010), *Applied statistics and probability for engineers 5th ed*, John Wiley & Sons, Arizona, USA.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. C. and Hubele, N. F., (2011), *Engineering statistics 5th ed*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Park B. and Qi, M., (2005), *Development and evaluation of a procedure for the calibration of simulation models*, Transportation Research Record, Vol. 193, pp: 208-217.
- Park B. and Schneeberger, J., (2003), *Microscopic simulation model calibration and validation case study of VISSIM simulation model for a coordinated actuated signal system*, Transportation Research Record, Vol. 1856, pp: 185-192.
- Park B. and Won, J., (2006), *Microscopic simulation model calibration and validation handbook*, FHWA, Virginia, USA.
- PTV AG, (2010), *VISSIM 5.30 User Manual*, Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.
- Punzo V., Ciuffo, B., and Torrieri V., (2007), *A framework for the calibration of microscopic traffic flow model*, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., USA.
- Wiedemann and Reiter, (1991), *Microscopic traffic simulation the simulation system MISSION*, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Zhang, M., Ma, J., and Dong, H., (2008), *Developing calibration tools for microscopic traffic simulation final report*, University of California, Berkeley, USA.

A Sensitivity Analysis Method for Traffic Micro Simulators Parameters, Case Study: A Freeway Bottleneck in VISSIM

M. Raoufi¹, A. Shariat Mohaymany²

¹ M.Sc., Civil Engineering School, IUST, Tehran, Iran, raoufi_mahmoud@harkatepaydar.com

² Associate Professor, Civil Engineering School, IUST, Tehran, Iran, shariat@iust.ac.ir

Abstract

Traffic micro simulators have many parameters that should be calibrated before using. Most of the proposed procedures for the traffic simulators calibration are as minimizing the difference between simulation results and field observations by a heuristic search method. As a result, the search space is to be minimized for finding the more reliable answer in shorter time. So only the effective parameters should be contained in the search space. These parameters could be determined by an appropriate sensitivity analysis method. Both main effects and interactions of the parameters are to be noticed in the sensitivity analysis of traffic simulators. In spite of the importance of the sensitivity analysis stage in traffic simulators calibration, it isn't described in detail in most of the related papers and also inaccurate methods such as "One factor at a time" or time consuming and impractical ones such as "Full factorial experimental design" are introduced in some cases.

In this paper, a sensitivity analysis method based on the " 2^{k-p} Fractional Factorial Experimental Design" is described that estimates the main effects of the parameters and their interactions of lower than a pre specified level with adequate accuracy in acceptable time. The method is applied to the Vissim model of a freeway bottleneck in Tehran. The main effects of 26 selected parameters and their 325 two way interactions on flow capacity and queue length are estimated. This way with 1024 simulation runs, 11 main effects and 13 interactions identified as effective on flow capacity and 5 main effects and 10 interactions on queue length. The parameters of these main effects and interactions are to become adjusted in calibration of the same models.

Keywords: Traffic, Micro simulation, Calibration, Sensitivity analysis, Experimental design, VISSIM.