

روندی برای کالیبراسیون نرم افزارهای ریز شبیه ساز ترافیک

محمود رؤفی^۱، دکتر افشین شریعت مهیمنی^۲

۱- کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل و نقل دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران،
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

امروزه نرم افزارهای ریز شبیه ساز به عنوان ابزارهای قدرتمند تحلیل در مطالعات ترافیک استفاده می شوند. این نرم افزارها خودروها را با استفاده از مدل های تعقیب خودرو، تغییر خط و رفتار در تقاطع شبیه سازی می کنند و توانایی آنها در بازتولید رفتار رانندگی و شاخص های عملکرد ترافیکی محل مورد مطالعه، به تنظیم درست پارامترهای این مدل ها وابسته است. فرایند تنظیم این پارامترها که کالیبراسیون یا پرداخت نامیده می شود، گام اساسی در بکارگیری درست هر شبیه ساز است و روشهای ارائه شده برای انجام آن تنوع زیادی دارند. در این مقاله با مرور اغلب روشهای کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک؛ روندی کاربردی همراه با راهنمایی های لازم برای این کار، آزمونهای همخوانی مناسب برای بکارگیری در این فرایند و برخی معیارهای تعیین موفقیت کالیبراسیون ارائه شده است.

کلید واژه ها: مهندسی ترافیک، شبیه سازی، کالیبراسیون

۱- مقدمه

امروزه شبیه سازهای ترافیک به عنوان ابزارهایی قدرتمند در مطالعات ترافیک استفاده می شوند. کاربرد اصلی این نرم افزارها مطالعه شبکه هایی است که نواحی مختلف آنها تحت تاثیر یکدیگر قرار می گیرند؛ برای نمونه آزادراهی که در آن شلوغی ناشی از یک خروجی پایین دست بر عملکرد ورودی بالادست تاثیر دارد و یا شبکه ای که در آن صف دسترسی یک تقاطع تا تقاطع دیگری در بالادست امتداد می یابد و بر عملکرد آن تاثیر می گذارد. به دلیل اینکه روشهای تحلیلی (مانند روشهای کتاب راهنمای گنجایش راه) هر تسهیل ترافیکی را به طور مجزا و بدون در نظر گرفتن اثر تسهیلات مجاور بررسی می کنند؛ تحلیل موارد اشاره شده با این روشها

دقیق نخواهد بود (دلینگ و همکاران، ۲۰۰۴). از کاربردهای دیگر آنها می توان به ارزیابی اثر تغییر در زیرساختهای شبکه (مثل اضافه یا کم کردن یک خط معبر یا یک کمان شبکه)، تغییر در نحوه کنترل ترافیک (مثل تغییر زمانبندی چراغ یا نصب یک سامانه کنترل شیبراه) و یا بکارگیری سامانه های هوشمند حمل و نقل (مثل سامانه گزارش اطلاعات مسیر به رانندگان) اشاره کرد.

شبیه سازها خودروها را با استفاده از مدل‌های تعقیب خودرو (تعیین کننده حرکت در امتداد خط عبور)، تغییر خط (تعیین کننده حرکت در عرض معبر و یا بین خطوط) و رفتار در تقاطع (تعیین کننده عملکرد در مقابل خودروهای سایر مسیرها) در شبکه تعریف شده شبیه سازی می کنند. مدل‌های یاد شده پارامترهای قابل تنظیمی دارند که توانایی شبیه سازها در بازتولید رفتار رانندگی و شاخصهای عملکرد ترافیکی محل مورد مطالعه، به تنظیم درست آنها وابسته است. این فرایند که کالیبراسیون یا پرداخت نامیده می شود، در کنار تعریف صحیح شبکه، گام اساسی در بکارگیری درست هر شبیه ساز ترافیک است. یک بررسی توسط بلومبرگ و همکاران (۲۰۰۳) بر روی تعدادی از شبیه سازها نشان می دهد که در برخی موارد، حدود ۱۳ درصد انحراف در بازتولید سرعت متوسط آزادراه برای شرایط موجود، می تواند باعث ۶۹ درصد انحراف در برآورد سرعت برای شرایط آینده شود.

در سالهای اخیر روشهای مختلفی برای کالیبراسیون ریز شبیه سازها ارائه شده است که از بکارگیری روشهای بهینه سازی ساده بر مبنای مقایسه گرافیکی برخی خروجیهای شبیه سازی با مقادیر واقعی، تا استفاده از روشهای بهینه سازی پیشرفته و بکارگیری آزمونهای همخوانی برای مقایسه نتایج با واقعیت گسترده اند. با این وجود، به دلیل گوناگونی شبیه سازها، مدل‌های پایه و موارد کاربرد آنها، هنوز روش یکسانی برای فرایند کالیبراسیون تنظیم نشده و صرفاً به ارائه راهنمایی اکتفا گردیده است. در ایران نیز کاربرد شبیه سازها رو به افزایش است اما در بسیاری از موارد، کالیبراسیون آنها نادیده گرفته می شود.

در این مطالعه با بهره گیری از نقاط قوت روشها و راهنماییهای ارائه شده، روشی برای کالیبراسیون ریز شبیه سازهای ترافیک ارائه می گردد و در کنار آن آزمونهای همخوانی قابل استفاده در فرایند کالیبراسیون و برخی معیارهای تعیین موفقیت کالیبراسیون معرفی می شوند.

۲- پیشینه پژوهش و مبانی نظری

۲-۱- آشنایی با فرایند کالیبراسیون

به طور کلی برای کالیبراسیون، پارامترها در محدوده ای مناسب تحلیل حساسیت می شوند و پارامترهای دارای تاثیر قابل توجه مشخص می گردند. سپس محدوده قابل قبول و دقت لازم در تنظیم هر یک از آنها تعیین می شود. پارامترهای موثر قابل اندازه گیری، با برداشت های میدانی تعیین مقدار می شوند و پس از ساخت نمونه و وارد کردن آنها، جست و جو برای یافتن مقدار پارامترهای غیر قابل اندازه گیری که بیشینه کننده شباهت بین

نمونه و واقعیت باشد صورت می گیرد. این شباهت با استفاده از یک آزمون همخوانی برای یک یا چند شاخص ترافیکی، کمی و اندازه گیری می شود و در نتیجه تعیین آزمون همخوانی مناسب از مهمترین گامهای کالیبراسیون است. پس از این مراحل، با مقایسه شاخصهای دیگر شبیه سازی با واقعیت، کارکرد نمونه اعتبارسنجی می شود.

به خاطر اینکه تعداد پارامترهای غیر قابل اندازه گیری شبیه سازها معمولاً زیاد است و این پارامترها در اغلب موارد محدوده قابل قبول پیوسته و نسبتاً گسترده ای دارند و بین آنها اندرکنش وجود دارد؛ جست و جوی اشاره شده که در واقع حل مسئله بهینه سازی غیر خطی چند پارامتری است، با بهره گیری از روشهای بهینه سازی انجام می گیرد. در مسئله بهینه سازی اشاره شده، پارامترهای نمونه و مقدار همخوانی به ترتیب متغیرهای مستقل و متغیر وابسته هستند و نرم افزار شبیه ساز در کنار آزمون همخوانی نقش رابطه این متغیرها را ایفا می کنند.

۲-۲- مروری بر روشهای ارائه شده برای کالیبراسیون

در این بخش برخی روشهای پیشنهاد شده برای کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک مرور می شوند. دلینگ و همکاران (۲۰۰۴a و ۲۰۰۴b) کالیبراسیون را در سه مرحله کالیبراسیون گنجایش تسهیلات ترافیک، کالیبراسیون مدل انتخاب مسیر و کالیبراسیون عملکرد کل مجموعه انجام دادند. ایشان دو مرحله اول را به دو زیر مرحله کالیبراسیون پارامترهای موثر بر شبکه (کلی) و کالیبراسیون پارامترهای موثر بر یک کمان خاص (محلی) تفکیک کردند. ژنگ و همکاران (۲۰۰۸) برای کالیبره کردن نمونه یک آزادراه، ابتدا پارامترهای سطح کلی و سپس پارامترهای سطح محلی (موثر بر قسمتهای خاص مانند گلوگاهها و تقاطعها) را تنظیم نمودند و پس از آن در یک فرایند تکرارشونده، مقدار پارامترهای انتخاب زمان و مسیر سفر را هم زمان با تخمین ماتریس تقاضا تعیین کردند. آنها برای کالیبراسیون پارامترهای سطح کلی از دو شاخص نمودار اساسی سرعت بر حسب چگالی و نیم رخ جریان (جریان عبوری از یک مکان بر حسب زمان) استفاده نمودند. کیم (۲۰۰۶) و کیم و همکاران (۲۰۰۵) نمونه یک شریانی دارای تقاطعهای چراغدار هماهنگ را مورد مطالعه قرار دادند. چون توزیع زمان سفر خودروها در محل نرمال نبود، به جای استفاده از میانگین زمان سفر، توزیع آن را به عنوان شاخص ارزیابی همخوانی به کار بردند. در نتیجه برای سنجش همخوانی از روشهای غیر پارامتری آزمون Moses Distribution Free Rank-like همراه آزمون Wilcoxon Rank-Sum و یا آزمون Kolmogorov-Smirnov استفاده کردند. گمس و همکاران (۲۰۰۴) نمونه یک آزادراه را با شناخت و انتخاب دقیق پارامترها و تحلیل نتایج شبیه سازی با مقادیر مختلف آنها و بکارگیری قضاوت مهندسی کالیبره نمودند. آنها برای ارزیابی کیفیت همخوانی شبیه سازی با واقعیت، نمودار سه بعدی سرعت متوسط بر حسب زمان و مکان را مورد توجه قرار دادند و در کنار آن به زمان و مکان وقوع گلوگاهها و طول صف آنها و نیز حجم جریان عبوری از خط خودروهای پر مسافر و همچنین عملکرد ورودیهای آزادراه توجه نمودند.

۳- روش شناسی تحقیق

در این مطالعه با بررسی روشهای ارائه شده برای کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک و بهره گیری از نقاط قوت روشها و راهنماییهای آنها، روندی برای کالیبراسیون ریز شبیه سازهای ترافیک ارائه می گردد و در کنار آن آزمونهای همخوانی قابل استفاده در فرایند کالیبراسیون و برخی معیارهای تعیین موفقیت کالیبراسیون معرفی می شوند.

۴- یافته های تحقیق

۴-۱- روندی برای کالیبراسیون ریز شبیه سازهای ترافیک

کالیبراسیون باید با شناخت کامل از نرم افزار و مدل‌های پایه آن و طبق روندی منظم صورت گیرد تا کارشناس در کمترین زمان ممکن به هدف برسد. در این بخش مراحل فرایند کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک بر پایه هولندر و لیو (۲۰۰۸) و رئوفی (۱۳۹۰) توضیح داده می شود.

تعیین شاخص ارزیابی، آزمون همخوانی و مدت اصلی شبیه سازی:

در این مرحله با توجه به هدف ساخت مدل (داده هایی که قرار است با استفاده از نمونه برآورد شود) و داده های قابل برداشت (مانند جریان و سرعت)، شاخص ارزیابی و آزمون همخوانی (به صورت تابع ریاضی یا آزمون آماری) انتخاب می شود. برای مثال اگر هدف از ساخت نمونه بررسی قابلیت اطمینان زمان سفر است، باید انحراف معیار زمان سفر با نمونه برآورد شود؛ در نتیجه نیاز است توزیع زمان سفر خودروها در شبیه سازی و واقعیت همخوان باشد و در فرایند کالیبراسیون این همخوانی باید با آزمون آماری مناسبی بررسی شود. کارشناس باید شناخت کافی از شاخصهای ارزیابی و آزمون های همخوانی داشته باشد، تا بتواند شاخص و آزمون مناسب را انتخاب کند. بنا بر شرایط نمونه از شاخصهای جریان یا سرعت بر حسب مکان و زمان، زمان یا سرعت سفر، طول صف، زمان تاخیر، نیم رخ سرعت (میانگین سرعت یک مکان بر حسب زمان)، نمودار سرعت بر حسب جریان (برای یک مقطع از معبر یا همفزون شده آن برای امتدادی از معبر) و یا شاخصهای دیگر می توان استفاده کرد (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۸).

بازه های زمانی ثبت نتایج شبیه سازی، بر مقدار همخوانی در روند کالیبراسیون موثر هستند (پونزو و همکاران، ۲۰۰۷). اگر این بازه ها بیش از حد کوچک باشند، تاثیر اتفاقی بودن شرایط شبیه سازی بیش از اندازه در نتایج تاثیر می گذارد و اگر بیش از حد بزرگ باشند، اثر متفاوت بودن توزیع حجم ترافیک طی زمان قابل مشاهده و بررسی نخواهد بود. بنا به نوع تسهیلات ترافیکی و شرایط نمونه معمولا بازه ای بین ۵ تا ۱۵ دقیقه مناسب است.

به دلیل ماهیت اتفاقی داشتن شبیه سازها، میانگین نتایج چند تکرار شبیه سازی به عنوان پاسخ قابل اطمینان در نظر گرفته می شود. تعداد تکرار لازم به منظور بدست آوردن دقت و اطمینان مورد نظر، برای همه شاخصهای

آزمونهای همخوانی محاسبه می شود و بیشترین تعداد به عنوان کمینه تکرار مورد نیاز در نظر گرفته می شود. تعیین تعداد تکرارها با دو روش ترتیبی و دو گامی انجام می شود (تالدو و کوتسوپلوس، ۲۰۰۴) که هر دوی آنها فرض بر توزیع نرمال نتایج دارند؛ اما روش دو گامی که در رابطه ۱ معرفی شده است، به دلیل اینکه انحراف معیار دقیق تری از توزیع نتایج را استفاده می کند مناسب تر است (رتوفی، ۱۳۹۰). در رابطه ۱، R کمینه تکرار مورد نیاز برای تخمین میانگین شاخص X (خروجی شبیه سازی) با رواداری d در سطح اطمینان α (معمولا ۰٫۹۵) است. در این رابطه $t_{\alpha/2}$ مقدار بحرانی توزیع t در سطح اطمینان α و s_{xR_0} انحراف معیار توزیع شاخص X (نتایج تکرارهای شبیه سازی) براساس R_0 تکرار است که از پیش محاسبه می شود.

$$R = \left[\frac{s_{xR_0} * t_{\alpha/2}}{d} \right]^2 \quad (1)$$

درباره مدت اصلی شبیه سازی نیز در این مرحله تصمیم گیری می شود. در آغاز شبیه سازی، شبکه بر خلاف شرایط واقعی خالی است و بنابراین رفتارها به صورت رفتار در جریان آزاد خواهد بود. در نتیجه پیش از آغاز زمان اصلی شبیه سازی، از زمان گرم کردن برای شروع بارگذاری شبکه و رساندن آن به وضعیت واقعی استفاده می شود. این زمان حداقل به اندازه مدت یک سفر معمولی در شبکه است. باید توجه گردد که در زمان گرم کردن صف غیر واقعی در شبکه ایجاد نشود.

در بعضی شبیه سازها برخی از داده ها مانند زمان سفر، پس از رسیدن خودروها به مقصد ثبت می گردند (پی تی وی، ۲۰۱۰). بنابراین اگر تعداد زیادی از خودروها در پایان زمان شبیه سازی هنوز در شبکه باشند، به رغم اثر داشتن در شبیه سازی، در نتایج ثبت نخواهند شد. برای رفع این اشکال، در این موارد از زمان سرد کردن استفاده می گردد که زمانی بدون بار ورودی است و پس از پایان زمان اصلی شبیه سازی اضافه می شود. این زمان به خودروهایی که در پایان زمان اصلی شبیه سازی در میان راه هستند، فرصت می دهد تا به مقصد برسند و در نتایج ثبت شوند (اسمیت و بلویت، ۲۰۱۰). باید توجه داشت که داده هایی مانند جریان، سرعت و چگالی در زمان سرد کردن دچار خطا هستند و نباید مورد استفاده قرار گیرند.

از آنجا که نمونه ها بیشتر برای تحلیل وضعیت اوج تقاضا ساخته می شوند، لازم است مدت شبیه سازی شامل زمان گرم کردن، زمان اصلی شبیه سازی شامل دوره پیش از اوج (قبل از تشکیل صف ها) تا دوره پس از اوج (بعد از پاک شدن همه صف ها) و در صورت نیاز زمان سرد کردن باشد.

ساخت نمونه:

در این مرحله پس از جمع آوری داده ها و ساخت مدل، اشکالهای احتمالی آن در بازتولید شرایط واقعی ترافیک (نه شرایط مشاهده شده میدانی) با روش مناسب برطرف می شود. نمونه هایی معمول از این اشکالها عبور خودروها از روی یکدیگر، خروج مستقیم خودروهای برخی خطوط در گلوگاهها، تشکیل صفهای غیر واقعی، عبور بعضی خودروها از چراغ قرمز و سرگردانی خودروهای حمل و نقل همگانی بعد از اتمام مسیر هستند.

تعیین راهبرد حل مسئله کالیبراسیون:

در این مرحله با بررسی اختلافهای شبیه سازی نمونه با واقعیت و دلایل آنها و با در نظر گرفتن شرایط نمونه، داده های در دسترس و نرم افزار شبیه ساز؛ راهبرد حل مسئله تعیین می شود. به بیان روشن تر تعیین می گردد از روش کالیبراسیون هم زمان استفاده شود یا از روش شکستن مسئله به زیرمسئله ها و استفاده از روند ارائه شده برای کالیبراسیون هر یک از آنها.

به منظور کالیبره کردن نمونه یک شبکه معابر به روش شکستن مسئله و حل زیرمسئله ها، ابتدا برای تنظیم پارامترهای موثر بر گنجایش (مانند پارامترهای رفتار رانندگی یا طول تغییر خط یک خروجی)، هر یک از کمانها یا زیر شبکه ها به طور جداگانه مدل و سپس کالیبره می شوند. پس از آن، کل شبکه با دادن ماتریس تقاضا به طور یکجا مدل می شود و با ثابت قرار دادن پارامترهای کالیبره شده در مرحله قبل، پارامترهای انتخاب مسیر تنظیم می شوند. سپس در صورت نیاز به بهبود نتایج، تغییرات جزئی بر پارامترها اعمال می شود. لازم به توضیح است که زیر شبکه ها باید تا حد ممکن از اثر شرایط پایین دست (مانند گلوگاه) دور باشند و یا در صورت امکان، اثر واقعی شرایط پایین دست نیز در آنها اعمال شود. همچنین باید بین هر مبدا و مقصد زیرشبکه ها فقط یک مسیر باشد، تا بتوان از شمارش جریان، ماتریس تقاضای دقیق آنها را به دست آورد. این کار باعث می شود خطای تخمین ماتریس تقاضا و یا مدل انتخاب مسیر بر این بخش از فرایند تاثیر نگذارد (تالدو و همکاران، ۲۰۰۳). در مواردی که کالیبراسیون کل شبکه بیش از اندازه وقتگیر است، می توان از نتایج کالیبراسیون یک کمان یا یک زیر شبکه، برای کمانها یا زیر شبکه های شبیه آن استفاده کرد (ژا و همکاران، ۲۰۰۴ و تالدو و همکاران، ۲۰۰۳). این زیر شبکه ها باید تا حد ممکن از نظر شرایط اثرگذار بر ترافیک (مانند شرایط هندسی از جمله تعداد و عرض خطوط، شیب و قوس، شرایط روسازی، محدودیت سرعت، پارک حاشیه ای و کاربری اطراف) شبیه باشند.

برای کالیبره کردن نمونه یک آزادراه به روش شکستن مسئله و حل زیر مسئله ها، ابتدا قسمتهای پایه آن به طور جداگانه با دادن بار ورودی مدل می شوند (به منظور ایجاد اثر گلوگاه پایین دست در این نمونه ها، می توان در پایین دست آنها محدوده های کاهش سرعت قرار داد). این نمونه ها برای تنظیم پارامترهای تعقیب خودرو و پارامترهای تغییر خط غیر ضروری و سایر پارامترهای مربوط مورد استفاده قرار می گیرند. سپس زیر شبکه های ورودیها و خروجیها، به طور جداگانه مدل و پارامترهای مربوط به آنها (پارامترهای تغییر خط ضروری) کالیبره می شوند. پس از آن، کل آزادراه با دادن ماتریس تقاضا به طور یکجا مدل می شود و در صورت نیاز برای بهبود نتایج کالیبراسیون تغییرات جزئی بر پارامترها اعمال می گردد.

تعیین پارامترها، محدوده و دقت آنها:

در این مرحله با شناخت دقیق مدل‌های پایه نرم افزار، پارامترهایی که گمان می رود تغییر آنها در رفع اختلاف مدل با واقعیت (افزایش مقدار همخوانی) موثر باشد، تعیین می شوند و محدوده مناسبی برای آنها مشخص می گردد. سپس با یک روش تحلیل حساسیت، پارامترهای موثر مشخص می شوند. پس از این با توجه به نتایج، محدوده قابل قبول برای پارامترهای موثر و نیز دقت مورد نیاز در برآورد آنها تعیین می گردد. به دلیل اندرکنش پارامترها، برای تحلیل حساسیت آنها نمی توان از روش تغییر یک پارامتر در زمان استفاده کرد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه هدف این مرحله غربال کردن پارامترهای موثر است، نیازی به نتایج بسیار دقیق نیست. در این موارد از روشهای طراحی آزمایش چند عاملی کسری استفاده می شود. این روشها با آزمایش تعدادی از ترکیبهای ممکن پارامترها، اثرات اصلی و اندرکنشهای مهم را در مدت زمان مناسب به دست می دهند. برای مطالعه بیشتر درباره این روشها می توانید به مونتگومری و رانگر (۲۰۱۰)، مونتگومری (۲۰۱۲)، مونتگومری و همکاران (۲۰۱۱) و رئوفی (۱۳۹۰) و رئوفی و شریعت (۱۳۹۲) مراجعه کنید. کوریان (۲۰۰۰) و رئوفی (۱۳۹۰) از این روشها در فرایند کالیبراسیون استفاده کرده اند.

پیشنهاد می شود پارامترهای با تاثیر بیشتر در یک مرحله کالیبراسیون و پارامترهای موثر اما با تاثیر کمتر در مرحله ای دیگر 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.

حل مسئله بهینه سازی:

به دلیل نبود رابطه واضح ریاضی بین پارامترهای ورودی و مقادیر خروجی شبیه سازها و همچنین ماهیت اتفاقی داشتن این ابزارها، رابطه بین ورودیها و خروجیهای آنها غیر قابل مشتق گیری است. در نتیجه برای حل مسئله کالیبراسیون از روشهای بهینه سازی که نیاز به مشتق تابع هدف ندارند، استفاده می شود. برخی از این روشها روش جست و جوی تصادفی (آزمون و خطا) (رائو، ۲۰۰۹) جست و جوی شبکه (رائو، ۲۰۰۹)، مقطع طلایی (دلینگ و همکاران، ۲۰۰۴)، سیمپلکس (کیم و ریلت، ۲۰۰۳)، کامپلکس (تالدو و همکاران، ۲۰۰۴)، شبه نیوتن (هورداکیس و همکاران، ۲۰۰۳)، گرم کردن شبیه سازی شده (هویر و فلندورف، ۱۹۹۷)، الگوریتم تکاملی (مننی و همکاران، ۲۰۰۹ و ۲۰۰۸) و الگوریتم ژنتیک (کیم و ریلت، ۲۰۰۴؛ پارک و کی، ۲۰۰۵؛ پارک و ون، ۲۰۰۶ و ژنگ و همکاران، ۲۰۰۸) هستند که هر یک از آنها در جایگاه مناسب می تواند برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شود. برای آشنایی بیشتر با این روشها می توانید به رائو (۲۰۰۹) مراجعه کنید. کارشناس باید آشنایی کافی با روشهای بهینه سازی داشته باشد تا بتواند انتخاب درستی انجام دهد و از روش انتخاب شده به طور صحیح استفاده کند.

اعتبارسنجی:

پس از اینکه مجموعه مقادیر پارامترها با حل مسئله بهینه سازی به دست آمد، نمونه شبیه سازی شده اعتبارسنجی می شود. با این کار بررسی می گردد که نمونه تا چه اندازه در بازتولید واقعیت موفق است. در اعتبارسنجی باید همه اهداف نمونه (شاخصهایی که قرار است با استفاده از مدل برآورد شوند) در همه سطح نمونه (همه کمانها و تقاطعهای شبکه) و در همه زمان شبیه سازی (اوج و غیر اوج) بررسی شوند. به بیان دیگر باید مقدار همه شاخصهای مهم بررسی شود تا صحت پاسخ تایید گردد. اعتبارسنجی در دو سطح مشاهده پویانمایی و بررسی آماری انجام می شود. در مشاهده پویانمایی که به تنهایی برای تایید اعتبار نمونه کافی نیست، شباهت پویانمایی حاصل از شبیه سازی با واقعیت بررسی می شود. در بررسی آماری شباهت شبیه سازی به واقعیت به صورت کمی با استفاده از توابع ریاضی یا آزمونهای آماری بررسی می گردد.

در ادامه بهتر است یک فرایند اعتبارسنجی نیز با شرایط ترافیکی متفاوتی نسبت به آنچه در مراحل قبلی کالیبراسیون استفاده شده است انجام شود تا توانایی نمونه در برآورد شاخصهای ترافیکی وضعیتی که با آن کالیبره نشده است سنجیده شود. این کار می تواند با دادن احجام ترافیکی یک روز متفاوت به نمونه و بررسی شاخصهای نظیر آن صورت گیرد.

مدل کالیبره شده باید فقط در شرایطی که مورد اعتبارسنجی قرار گرفته، استفاده شود (هولندر و لیو، ۲۰۰۸). برای روشن تر شدن مطلب چند مثال مطرح می گردد. اگر برای نمونه یک شریانی، توزیع زمان سفر خودروها اعتبارسنجی نشده باشد؛ آنگاه این نمونه نمی تواند برای برآورد شاخصی مانند قابلیت اطمینان زمان سفر استفاده شود. اگر اعتبارسنجی نمونه یک آزادراه، فقط در زمانهای جریان آزاد انجام شده باشد؛ آنگاه این نمونه نمی تواند برای برآورد شاخصهای ترافیکی زمان تراکم ترافیک استفاده گردد. به عنوان مثالی دیگر از نمونه کالیبره شده یک میدان، نمی توان با اطمینان برای بررسی سناریوی تبدیل آن به تقاطع استفاده کرد (رئوفی، ۱۳۹۰).

در مرحله اعتبارسنجی برای بهبود نمونه، می توان پارامترهایی را که روی تابع همخوانی کالیبراسیون تاثیر کوچکی داشتند تنظیم کرد.

۴-۲- آزمونهای همخوانی قابل استفاده در کالیبراسیون

در این قسمت برخی از آزمونهای همخوانی مناسب استفاده شده در فرایند کالیبراسیون معرفی می شوند. در روابط ۲ تا ۱۷، علائم x و y به ترتیب مقدار شبیه سازی شده و اندازه گیری شده، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب متوسط مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده، s_x و s_y انحراف معیار این مقادیر، N تعداد داده ها و i شمارنده است.

خطا که با E در رابطه ۲ نشان داده شده است، ساده ترین آزمون برای اندازه گیری همخوانی است. درصد خطا که با PE در رابطه ۳ نشان داده شده است، برای سنجش همخوانی مقدار شاخص اندازه گیری شده و شبیه

سازی شده یک زمان و مکان استفاده می شود. به دلیل تقسیم مقدار اختلاف بر مقدار اندازه گیری شده میدانی، اختلاف نسبی را به دست می دهد. در نتیجه در مواردی که فقط مقدار مطلق اختلاف اهمیت دارد نباید استفاده شود. مربع خطا که با SE در رابطه ۴ نشان داده شده است، به دلیل به توان دو رساندن، اختلافهای با مقدار کمتر از یک را کوچک تر و اختلاف های با مقدار بیشتر از یک را بزرگ تر می کند. اگر اختلافهای کوچک معمول در خروجی های شبیه ساز، که به خاطر حالت اتفاقی ایجاد می شوند، به صورت اعداد کوچک تر از یک و اختلاف های واقعی به صورت اعداد بزرگ تر از یک در این تابع وارد شوند، آنگاه اختلافهای اتفاقی معمول کم اثر و اختلافهای واقعی موثرتر می شود. این کار می تواند با تقسیم مقدار اختلاف بر انحراف معیار نتایج شبیه سازی انجام شود. تالدو و همکاران (۲۰۰۴) از مربع خطا برای جمع کردن اثر چند شاخص (سرعت و چگالی) در مقدار همخوانی، با بکارگیری ضرایب مقیاس استفاده کرده اند. میانگین خطا که با ME در رابطه ۵ نشان داده شده است، به این دلیل که اختلافهای با علامت متفاوت (مثبت و منفی) را با یکدیگر خنثی می کند، باید در جایی به کار رود که علامت همه اختلافها یکی است. میانگین نرمال شده خطا، میانگین مطلق خطا، میانگین مطلق نرمال شده خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و مجذور میانگین مربعات نرمال خطا نیز توابع همخوانی دیگری هستند که به ترتیب در روابط ۶ تا ۱۰ با علامتهای MNE، MAE، MANE، RMSE و RMSNE نشان داده شده اند.

$$E = x_i - y_i \quad (۲)$$

$$PE = \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (۳)$$

$$SE = \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad (۴)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad (۵)$$

$$MNE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (۷)$$

$$MANE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right| \quad (۸)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (۹)$$

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (۱۰)$$

ضریب همبستگی که با r در رابطه ۱۱ نشان داده شده، همبستگی بین دو مجموعه داده اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است (تالدو و کوتسوپلوس، ۲۰۰۴) و اندازه ای از پراکندگی مجموعه های داده اندازه گیری شده و شبیه سازی شده را نسبت به میانگین آنها، متناسب با انحراف معیارشان به دست می دهد. در رابطه ۱۱، j و k شمارنده هستند. ضریب همبستگی معمولاً مقداری بین منفی یک و مثبت یک دارد، در حالیکه مقدار صفر آن بیانگر ناهمخوانی دو نمونه است. هورداکیس و همکاران (۲۰۰۳) از این ضریب در کالیبراسیون استفاده کرده اند.

$$r = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_j (x_j - \bar{x})^2 * \sum_k (y_k - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

ضریب نابرابری تایل که با U در رابطه ۱۲ نشان داده شده، برای بررسی همخوانی توزیع داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مناسب است. مقدار U مساوی صفر بیانگر همخوانی کامل و U مساوی یک بیانگر ناهمخوانی کامل است. اگر U کوچکتر یا مساوی ۰٫۲ باشد، مجموعه داده شبیه سازی شده با مجموعه داده برداشت شده همخوان است (بارسلو، ۲۰۱۰). با توجه به رابطه ۱۳ ضریب نابرابری تایل به سه قسمت U_s ، U_m و U_c مطابق روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ تقسیم می شود (بارسلو، ۲۰۱۰) در روابط ۱۳ و ۱۶ علامت r ضریب همبستگی (مطابق رابطه ۱۱) است. مجموع این سه بخش همیشه برابر یک است. مقدار U_m بیانگر همخوانی میانگین دو نمونه و U_m برابر صفر نشانه همخوانی کامل و U_m برابر یک نشانه ناهمخوانی کامل است. مقدار U_s بیانگر همخوانی انحراف معیار دو نمونه و U_s برابر صفر نشانگر همخوانی کامل و U_s برابر یک بیانگر ناهمخوانی کامل است. مقدار U_c بیانگر ناهمخوانی اتفاقی دو نمونه و U_c مساوی یک نشانه همخوانی کامل دو نمونه (بیشینه ناهمخوانی اتفاقی) و U_c مساوی صفر نشانه ناهمخوانی کامل دو نمونه (عدم ناهمخوانی اتفاقی) است.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 = (\bar{x} - \bar{y})^2 + (s_x - s_y)^2 + 2(1 - r)s_x s_y \quad (13)$$

$$U_m = \frac{(\bar{x} - \bar{y})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (14)$$

$$U_s = \frac{(s_x - s_y)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (15)$$

$$U_c = \frac{2(1-r)s_x s_y}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (16)$$

آماره جفری ای هورز که با GEH در رابطه ۱۷ نشان داده شده است، برای بررسی همخوانی داده شبیه سازی شده و اندازه گیری شده یک زمان و مکان استفاده می شود. اگر مقدار آن از حد مشخصی (معمولا ۵) کمتر باشد، داده ها همخوان هستند. برای بررسی همخوانی مجموعه ای از داده های شبیه سازی شده و اندازه گیری شده با این آماره؛ در صورتی که حداقل درصد خاصی از آنها (مثلا ۷۵ درصد) همخوان باشند، مجموعه داده ها همخوان گفته می شود (کیوفو و پونزو، ۲۰۱۰).

$$GEH = \sqrt{2(x_i - y_i)^2 / (x_i + y_i)} \quad (17)$$

در برخی روشهای کالیبراسیون مانند روش کیم و ریلت (۲۰۰۴) و یا روش چپو و همکاران (۱۹۹۸) از تابع توانی خطا نیز به عنوان آزمون همخوانی استفاده شده که به خاطر اثر نامناسبی که تابع یاد شده بر حل مسئله کالیبراسیون دارد، در این مطالعه معرفی نشده است.

آزمونهای آماری که در ادامه معرفی می شوند، زمانی به کار می روند که توزیع یک پارامتر مانند زمان سفر شاخص کالیبراسیون باشد. از پنج آزمون معرفی شده، سه آزمون آخر ناپارامتری هستند؛ یعنی فرضی از چگونگی توزیع نمونه را استفاده نمی کنند. کارشناس باید با در نظر گرفتن شرایط مسئله و با آگاهی از چگونگی عملکرد و شرایط بکارگیری آزمونها، گزینه مناسب را انتخاب کند.

آزمون F برای بررسی یکسانی واریانس دو نمونه دارای توزیع نرمال به کار می رود (مونتگومری و رانگر، ۲۰۱۰). آزمون t برای بررسی یکسانی میانگین دو نمونه دارای توزیع نرمال با واریانس یکسان استفاده می شود (مونتگومری و رانگر، ۲۰۱۰).

آزمون Moses Distribution Free Rank-like برای بررسی یکسانی پراکندگی توزیع دو نمونه به کار می رود در حالیکه فرضی از چگونگی توزیع نمونه ها ندارد (کیم و همکاران، ۲۰۰۵). آزمون Wilcoxon Rank-Sum برای بررسی یکسانی میانگین توزیع دو نمونه دارای شکل و پراکندگی یکسان استفاده می شود، در حالیکه فرضی از چگونگی توزیع نمونه ها ندارد (مونتگومری و رانگر، ۲۰۱۰). آزمون Kolmogorov-Smirnov برای بررسی یکسانی توزیع دو نمونه به کار می رود در حالیکه فرضی از چگونگی توزیع نمونه ها ندارد (کیم، ۲۰۰۶ و کیم و همکاران، ۲۰۰۵).

آزمونهای همخوانی یاد شده، صرفا بخشی از موارد قابل استفاده هستند و می توان با بررسی و مطالعه، آزمون های مناسب تری را برای هر مسئله انتخاب کرد. انتخاب شاخص و آزمون همخوانی مناسب برای کالیبراسیون یکی از مهم ترین مراحل این فرایند است و پاسخ کالیبراسیون را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد.

برای تعیین موفقیت کالیبراسیون یا معتبر بودن نمونه ها، نمی توان معیار یکسانی مشخص کرد. به بیان دیگر معیارهای اعتبار هر نمونه، باید بر اساس وضعیت و شرایط آن و همچنین اهداف ساخت و کاربردهای آن تعیین گردد. برای مثال نمونه هایی که نسبت جریان به گنجایش آنها کم است و یا ابعاد آنها کوچک است باید دقیق تر از مواردی که این شرایط را ندارند کالیبره شوند. در این قسمت، برای آشنایی کارشناسان، بر اساس دلینگ و همکاران (۲۰۰۴) نمونه هایی از معیارهای تعیین موفقیت کالیبراسیون در زمینه های مختلف معرفی می گردند.

معیارهای اعتبار نمونه در بازتولید شاخص جریان:

- کمتر از ۱۰۰ خودرو بر ساعت خطا، در بیش از ۸۵ درصد کمانهای دارای جریان ساعتی زیر ۷۰۰
- کمتر از ۱۵ درصد خطا، در بیش از ۸۵ درصد کمانهای دارای جریان ساعتی بین ۷۰۰ تا ۲۷۰۰
- کمتر از ۴۰۰ خودرو بر ساعت خطا، در بیش از ۸۵ درصد کمانهای دارای جریان ساعتی بالای ۲۷۰۰
- کمتر از ۵ درصد خطا، در جمع جریان همه کمانهای شبکه
- شاخص GEH کمتر از ۵ برای جریان، در بیش از ۸۵ درصد کمانها
- شاخص GEH کمتر از ۴ برای جمع جریان همه کمانهای شبکه

معیارهای اعتبار نمونه در بازتولید شاخص زمان سفر:

- کمتر از ۱۵ درصد و کمتر از یک دقیقه خطا، در زمان سفر بیش از ۸۵ درصد کمانها

معیار اعتبار نمونه در بازتولید شاخص سرعت سفر:

- قابل قبول بودن نمودار سرعت بر حسب جریان برای کمانها، طبق نظر کارشناس

معیار اعتبار نمونه در بازتولید گلوگاهها:

- قابل قبول بودن [زمان و مکان] تشکیل [و از بین رفتن] صف ها، طبق نظر کارشناس

علاوه بر معیارهای بالا، در ژنگ و همکاران (۲۰۰۸) موارد دیگری نیز عنوان شده است، برای مثال:

- کمتر از ۵ درصد و کمتر از ۱,۶ کیلومتر بر ساعت خطا، در سرعت سفر بیش از ۸۵ درصد مسیرها در تایید اعتبار نمونه در بازتولید شاخص سرعت سفر

- قرارگیری مقدار اندازه گیری شده میدانی شاخص مجموع زمان حضور در صف، در بازه اطمینان ۹۰ درصدی نتایج تکرارهای شبیه سازی؛ برای هر یک از دسترس‌یها در تایید اعتبار نمونه در بازتولید عملکرد چراغ

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه درباره اهمیت کالیبراسیون شبیه سازهای ترافیک توضیح داده شد و با بهره گیری از نقاط قوت روشهای پیشنهاد شده روندی کاربردی برای کالیبراسیون شامل مراحل تعیین شاخص ارزیابی، آزمون همخوانی و مدت اصلی شبیه سازی، ساخت نمونه، تعیین راهبرد حل مسئله کالیبراسیون، تعیین پارامترها، محدوده و دقت آنها، حل مسئله بهینه سازی و اعتبارسنجی معرفی گردید. سپس آزمونهای همخوانی قابل استفاده در فرایند کالیبراسیون و برخی معیارهای تعیین موفقیت کالیبراسیون ارائه شد.

بدیهی است که با مطالعه و بررسی بیشتر می توان روندهای کاملتری را برای کالیبراسیون نمونه هر یک از انواع تسهیلات ترافیک از قبیل شریانی، آزادراه، تقاطع و میدان و یا شبکه معابر (شامل کالیبراسیون مدل انتخاب مسیر) تدوین کرد.

منابع

- Barcelo, J., (2010), *Fundamentals of Traffic Microsimulation*, Springer, Barcelona
- Bloomberg, L., Swenson, M. and Haldors, B., (2003), *Comparison of Simulation Models and the HCM*, Transportation Research Board Annual Meeting
- Cheu, R., Jin, X., Ng, K., Ng, Y. and Srinivasan, D., (1998), *Calibration of FRESIM for Singapore Expressway Using Genetic Algorithm*, Journal of Transportation Engineering Vol. 124, Issue 6, pp: 526-536
- Ciuffo, B. and Punzo, V., (2010), *Verification of traffic micro-simulation model calibration procedures: analysis of Goodness-of-Fit measures*, Transportation Research Board Annual Meeting
- Dowling, R., Skabardonis A. and Alexiadis, V., (2004), *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software*, FHWA, Oakland
- Dowling, R., Skabardonis A, Halkias, J., Mc Hale G., and Zammit, G., (2004), *Guidelines for Calibration of Microsimulation Models: Framework and Applications*, Transportation Research Record Vol. 1876, pp: 1-9
- Gomes, G., May, A. and Horowitz, R., (2004), *Congested Freeway Microsimulation Model Using VISSIM*, Transportation Research Record Vol. 1876, pp: 71-81

- Hollander, Y. and Liu, R., (2008), *The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models*, Transportation Vol. 35, No. 3, pp: 347-362
- Hourdakakis, J., Michalopoulos, P. and Kottommannil, J., (2003), *A Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models*, Transportation Research Record Vol. 1852, pp: 130-139
- Hoyer, R., and Fellendorf, M., (1997), *Parameterization of microscopic Traffic Flow Models through Image Processing*, 8th IFAC Symposium on Transport, Chania, Crete
- Jha, M., Gopalan, G., Garms, A., Mahanti, B., Toledo, T. and Ben-Akiva, M., (2004), *Development and Calibration of A Large Scale Microscopic Simulation Model*, Transportation Research Record, Vol 1876 , pp: 121-131
- Kim, K., and Rillet, L., (2004), *A Genetic Algorithm Based Approach to Traffic Microsimulation Calibration Using ITS Data*, Transportation Research Board Annual Meeting
- Kim, K., and Rillet, L., (2003), *Simplex Based Calibration of Traffic Micro-Simulation Models Using ITS data*, Transportation Research Record, Vol. 1855, pp: 80-89
- Kim, S., (2006), *Simultaneous Calibration of a Microscopic Traffic Simulation Model and OD Matrix*, Texas A&M University
- 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
- 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 Won, J., (2006), *Microscopic simulation model calibration and validation handbook*, FHWA, Virginia, USA
- 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
- PTV AG, (2010), *VISSIM 5.30 User Manual*, Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany

- Rao, S., (2009), *Engineering Optimization Theory and Practice 4th ed*, John Wiley & Sons, New Jersey
 - Smith, J., and Blewitt, R., (2010), *Traffic Modelling Guidelines TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice v3*, Transport for London, London
 - Toledo, T., Ben Akiva, M., Darda, D., Jha, M. and Koutsopoulos, H., (2004), *Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models with Aggregate Data*, Transportation Research Record Vol. 1876, pp: 10-19
 - Toledo, T. and Koutsopoulos, H., (2004), *Statistical Validation of Traffic Simulation Models*, Transportation Research Record Vol. 1876, pp: 142-150
 - Toledo, T. and Koutsopoulos, H., Davol, A., Ben Akiva, M.E., Burghout, W., Andreasson, I., Johansson, T., Lundin, C., (2003), *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Tools Stockholm Case Study*, Transportation Research Record Vol. 1831, pp: 65-75
 - Zhang, M., Ma, J., and Dong, H., (2008), *Developing calibration tools for microscopic traffic simulation final report*, University of California, Berkeley, USA
-
- رئوفی، محمود، (۱۳۹۰)، *ارائه روشی برای کالیبراسیون شبیه ساز ترافیک VISSIM برای آزاد راههای شهری*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت
 - رئوفی، محمود و شریعت مهمی، افشین، (۱۳۹۲)، *ارائه روشی برای تحلیل حساسیت پارامترهای شبیه سازهای ترافیک*، مطالعه موردی: مدل گلوگاه آزادراهی در شبیه ساز ویسیم، فصلنامه علمی پژوهشی پلیس راهور

A Calibration Method for Traffic Micro Simulators

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

Nowadays, traffic micro simulators are being used in traffic studies as powerful tools. They simulate vehicles via driving behavior models and their success in reproducing the field's driving behavior and traffic performance measures depends on correct adjustment of these models' parameters. This adjustment process that is called calibration is a main step in using micro simulators and its proposed methods are diverse. In this paper after reviewing the most important proposed methods of traffic micro simulators calibration, a method for this process is presented.

Keywords: Traffic, Micro simulation, Calibration.