

شبیه‌سازی رفتار حرکتی رانندگان با استفاده از مدل بهینه‌سازی رانندگان

سید محمد سادات حسینی، عضو هیأت علمی، پژوهشکده حمل‌ونقل، تهران، ایران،
منوچهر وزیری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران،
رسول جوادیان، کارشناس ارشد، پژوهشکده حمل‌ونقل، تهران، ایران،
E-mail: sadathoseini1@yahoo.com

چکیده

در این مقاله یک مدل خرد ترافیک برای بررسی رفتار حرکتی رانندگان در قسمت اصلی آزادراه ارائه شده است. در این مدل مانند مدل‌های سلولی سطح آزادراه به تعدادی سلول تقسیم شده که در هر زمان هر سلول یا خالی است یا توسط یک وسیله نقلیه اشغال شده است و حرکت وسایل نقلیه با جابجا شدن آنها در سلول‌های آزادراه توصیف می‌شود. در مدل پیشنهادی رفتار حرکتی رانندگان بر مبنای فرآیند بهینه‌سازی رانندگان جهت کاهش ریسک تصادف و افزایش سرعت توصیف شده است. در این مدل رانندگان در هر گام زمانی تصمیم می‌گیرند که در گام بعدی به کدام سلول بروند تا با کمترین ریسک تصادف و بیشترین سرعت ایمن مواجه بشوند. یک نرم افزار شبیه‌سازی خرد ترافیک با استفاده از مدل سلولی برای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی تهیه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های جمع‌آوری شده از شرایط واقعی نشان داده که مدل پیشنهادی برای توصیف رفتار حرکتی رانندگان در آزادراه‌های ایران معتبر است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، مدل سلولی، رفتار حرکتی رانندگان، بهینه‌سازی، ریسک، سرعت ایمن.

۱. مقدمه

رفتار تعقیب و تغییر خط وسایل نقلیه به طور جداگانه ارائه می‌شود [۲]. در اکثر این تحقیقات فرض بر این است که وسایل نقلیه در خط‌های خود و بین خط‌کشی، باقی‌مانده و به حرکت خود ادامه می‌دهند، مگر این که در شرایط خاص براساس فرضیات مدل‌های تغییر خط از خطی به خط دیگر تغییر خط دهند. در این مدل‌ها فرآیند تصمیم‌گیری رانندگان یک فرآیند دو مرحله‌ای است که رانندگان در مرحله اول سرعت خود را به نحوی تنظیم می‌کنند تا در خط حرکتی فعلی خود باقی بمانند، ولی اگر سرعت در خط فعلی قابل قبول نباشد، تغییر خط به خط‌های دیگر را مورد توجه قرار می‌دهند. در مرحله تغییر خط، اگر وضعیت در خط‌های مجاور بهتر از خط فعلی باشد، تغییر خط انجام می‌شود [۲،۵]. حتی در معادلات مدل‌هایی که فرض برآشفتگی و بی‌نظمی جریان ترافیک و همچنین عدم رعایت

تحلیل جریان ترافیک از دو دیدگاه خرد و کلان امکان‌پذیر است. در رفتار حرکتی خرد به نحوه حرکت تک تک وسایل نقلیه توجه می‌شود و در رفتار حرکتی کلان، متغیرهای کلان ترافیک نظیر چگالی، حجم و سرعت متوسط وسایل نقلیه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. [۱] یکی از روش‌های مطالعه جریان ترافیک استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی است. هماهنگ با دو دیدگاه خرد و کلان به ترافیک، مدل‌های شبیه‌سازی جریان ترافیک نیز به دو گروه شبیه‌سازی خرد و کلان تقسیم می‌شوند. در این میان نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک از دیدگاه خرد جایگاه ویژه‌ای دارند. تاکنون چندین نرم‌افزار شبیه‌سازی خرد در زمینه تحلیل ترافیک تهیه شده است [۲،۳،۴]. در اکثر مدل‌های شبیه‌سازی خرد ترافیک حرکت وسایل نقلیه در قالب دو مدل تعقیب، Car Following، و تغییر خط، Lane Changing، توصیف شده است. در این مدل‌ها غالباً

در یک سلول برای افزایش سرعت و کاهش خطر تصادف مطلوبیت آن سلول است. مطلوبیت سلول (X, Y) برای وسیله نقلیه ID در زمان t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U(ID, X, Y, t) = \alpha \cdot \ln(R(ID, X, Y, t)) + \beta \cdot VMSS(ID, X, Y, t) + \rho D \quad (1)$$

در رابطه فوق D یک متغیر dummy است. با توجه به این که رانندگان ترجیح می‌دهند در مسیر مستقیم حرکت کنند، سلول جلوی هر وسیله نقلیه بیش از سلول‌های چپ و راست انتخاب می‌شوند، بنابراین متغیر D تعریف شده تا اثر قرار داشتن سلول در همان موقعیت عرضی وسیله نقلیه را نشان دهد. متغیر D به وسیله رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$D = \begin{cases} 1 & \text{for the cells in the same } Y \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

در شکل ۱ الگوریتم تعیین موقعیت مناسب برای حرکت هر وسیله نقلیه در مدل پیشنهادی مشاهده می‌شود، همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، در هر گام شبیه‌سازی برای هر وسیله نقلیه ابتدا سلول‌هایی که امکان حرکت به آنها وجود دارد تعیین می‌شود، سپس حداکثر سرعت ایمن و ریسک این سلول‌ها محاسبه شده و سلولی که بیشترین مطلوبیت را دارد انتخاب می‌شود.

پس از این که هر وسیله نقلیه سلول مورد نظر در گام شبیه‌سازی بعدی را انتخاب کرده و سرعت خود را در حد سرعت ایمن تنظیم می‌کند، اگر سرعت فعلی وسیله نقلیه از این سرعت کمتر باشد، لازم است سرعت وسیله نقلیه با شتاب مناسب افزایش داده شود. به این ترتیب سرعت وسیله نقلیه در گام زمانی بعدی با استفاده از رابطه زیر افزایش داده می‌شود:

$$V_{ID}(t + \Delta t) = V_{ID}(t) + a_{ID} \cdot \Delta t \quad (3)$$

که در آن a_{ID} شتاب وسیله نقلیه در هنگام افزایش سرعت می‌باشد و در حدود $1/2 \text{ m/s}^2$ در نظر گرفته می‌شود [9]. به همین ترتیب اگر سرعت فعلی وسیله نقلیه از این سرعت بیشتر باشد، لازم است سرعت وسیله نقلیه با شتاب مناسب کاهش داده شود. به این ترتیب سرعت وسیله نقلیه در گام زمانی بعدی با استفاده از رابطه زیر کاهش داده می‌شود:

$$V_{ID}(t + \Delta t) = V_{ID}(t) - b_{ID} \cdot \Delta t \quad (4)$$

خط‌های حرکتی توسط رانندگان وجود دارد، رفتار وسایل نقلیه با توجه به موقعیت آنها در خط‌های حرکتی در نظر گرفته شده است [6].

در مدل‌های سلولی، بزرگراه به سلول‌های مستطیلی تقسیم می‌شود که هر وسیله نقلیه در هر زمان داخل یکی از این سلول‌ها قرار می‌گیرد و حرکت وسایل نقلیه با جابجا شدن آنها در این سلول‌ها توصیف می‌شود [3]. در این پژوهش یک نرم‌افزار شبیه‌سازی سلولی مبتنی بر زمان، Time-based، تهیه شده است که در آن مدل‌های تعقیب و تغییر خط ادغام شده و رفتار حرکتی وسایل نقلیه در یک مرحله و بر مبنای فرآیند بهینه‌سازی رانندگان توصیف شده است. مدل پیشنهادی بر اساس واقعیت‌های موجود در بسیاری از کشورها که در آنها رانندگان به قوانین راهنمایی و رانندگی کمتر توجه دارند، تهیه شده است و در آن بر خلاف مدل‌های دیگر به خط‌های حرکتی و موقعیت آنها، همچنین لزوم تبعیت رانندگان از قوانین رانندگی توجه نمی‌شود [7]. روش بهینه‌سازی رانندگان نیز بر اساس کاهش ریسک تصادف فرض شده است، یعنی رانندگان همیشه سعی می‌کنند در گام بعدی به سلولی بروند که کمترین ریسک را برای آنها داشته باشد.

در این مقاله ابتدا فرمولاسیون مدل پیشنهادی توضیح داده می‌شود، سپس نحوه جمع‌آوری اطلاعات موقعیت وسایل نقلیه بیان شده و چگونگی کالیبراسیون مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از موقعیت وسایل نقلیه توضیح داده می‌شود. در پایان اعتبار مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی رفتار حرکتی رانندگان اثبات می‌شود.

۲. فرمولاسیون مدل پیشنهادی

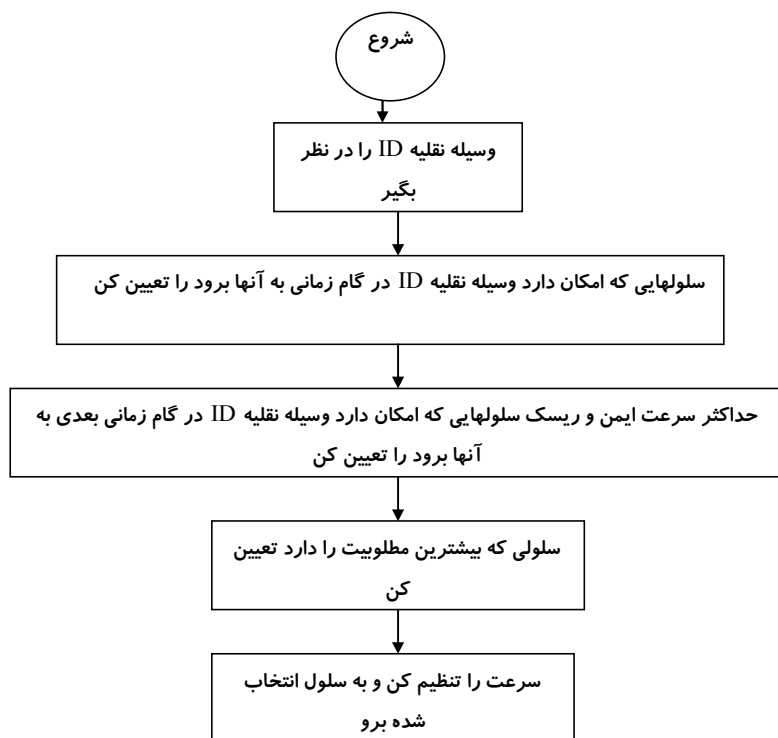
در این بخش مدل پیشنهادی در این پژوهش که در آن مدل‌های تعقیب و تغییر خط ادغام شده و رفتار حرکتی وسایل نقلیه بر مبنای فرآیند بهینه‌سازی رانندگان برای افزایش سرعت و کاهش خطر تصادف توصیف شده، معرفی می‌شود. به طور کلی در این مدل رانندگان حداکثر سرعتی که در هر سلول آزادراه می‌توانند به دست بیاورند و ریسک تصادف در آن سلول را محاسبه می‌کنند، سپس بر مبنای مطلوبیتی که به هر سلول اختصاص می‌دهند، تصمیم می‌گیرند که در گام زمان بعدی به کدام سلول بروند. تابع مطلوبیت، معیاری از تمایل یک تصمیم‌گیرنده برای یک نتیجه مشخص است [8] که در این مورد، تمایل راننده برای قراردادن

۱-۲ ابعاد سلول‌ها

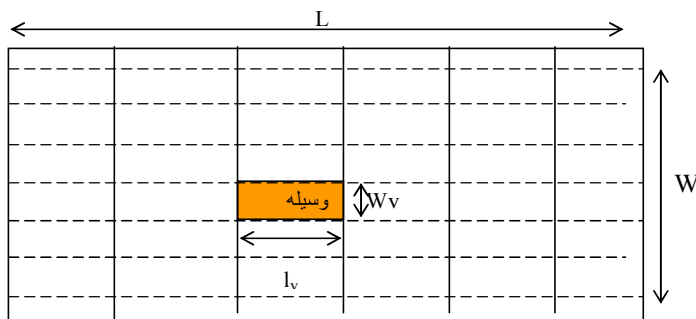
در مدل پیشنهادی فرض بر این است که وسایل نقلیه به خط‌های حرکتی توجه نمی‌کنند، در این مدل عرض و طول هر سلول به اندازه یک وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۲ اگر عرض هر وسیله نقلیه شخصی با W_v و طول هر وسیله نقلیه شخصی با l_v نمایش داده شود، ابعاد هر سلول l_v در W_v خواهد بود. به این ترتیب یک قسمت از آزادراه با طول L و عرض W از $(L/l_v)*(W/w_v)$ سلول تشکیل خواهد شد.

که در آن b_{ID} شتاب ترمز وسیله نقلیه ID است و در حدود 5 m/s^2 در نظر گرفته می‌شود [۹].

تحقیقات انجام شده در مورد رفتار حرکتی وسایل نقلیه در ایران و مقایسه آنها با آیین‌نامه رانندگی، نشان داده که اکثر رانندگان در ایران به قوانین آیین‌نامه راهنمایی و رانندگی در خصوص رعایت فاصله مطمئن با وسیله نقلیه جلویی توجه نمی‌کنند [۱۰]. به همین دلیل الگوریتم شکل ۱ پیشنهاد شده است تا بتوان با استفاده از آن رفتار رانندگان را مدل‌سازی کرد.



شکل ۱. الگوریتم تعیین موقعیت برای حرکت هر وسیله نقلیه



شکل ۲. نحوه تقسیم آزادراه به سلول‌ها

اگر وسیله نقلیه i در زمان t_0 با مشاهده مانع در مسیر، اقدام به ترمز کند و وسیله نقلیه دوم پس از گذشت زمان عکس العمل که با τ نمایش داده می شود، در زمان $t_0 + \tau$ اقدام به ترمز کند، برای این که دو وسیله نقلیه با هم تصادف نکنند، لازم است وسیله نقلیه ID با توجه به شتاب ترمز و سرعت اولیه هر دو وسیله نقلیه فاصله مناسب را رعایت کرده باشد. نمودار حرکت این دو وسیله نقلیه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، در آغاز دو وسیله نقلیه با سرعت های خود در حال حرکت بوده و نمودارهای حرکت آنها به صورت خط های مورب می باشند. در لحظه t_0 وسیله نقلیه اول ترمز می کند و سرعت آن شروع به کاهش می کند تا این که متوقف می شود و نمودار حرکت آن به صورت یک خط افقی درمی آید. در لحظه $t_0 + \tau$ وسیله نقلیه دوم نیز با مشاهده توقف وسیله نقلیه اول اقدام به ترمز می کند و سرعت آن شروع به کاهش می کند تا این که متوقف می شود و نمودار حرکت آن نیز به صورت یک خط افقی درمی آید. برای این که دو وسیله نقلیه با یکدیگر تصادف نکنند، لازم است فاصله دو وسیله نقلیه از یکدیگر حداقل به اندازه طول وسیله نقلیه جلویی باشد. یعنی فاصله خط های افقی نمودارهای حرکت وسایل نقلیه به اندازه طول وسیله نقلیه جلویی یعنی L قرار گیرد. با در نظر گرفتن معادلات حرکت این دو وسیله نقلیه، برای این که با یکدیگر برخورد نکنند، باید رابطه ۵ برقرار باشد.

$$L + V_{ID}\tau + \frac{V_{ID}^2}{2a_{ID}} = \frac{V_i^2}{2a_i} + d \quad (5)$$

برای این که سرعت مناسب برای وسیله نقلیه ID بر حسب سرعت وسیله نقلیه i و فاصله با آن به دست آید باید رابطه زیر برقرار باشد.

(۶)

$$V_{ID}^2 + 2a_{ID}\tau V_{ID} + 2a_{ID}(L - d - \frac{V_i^2}{2a_i}) = 0$$

با حل معادله درجه دوم فوق برای محاسبه سرعت وسیله نقلیه ID رابطه زیر به دست می آید:

(۷)

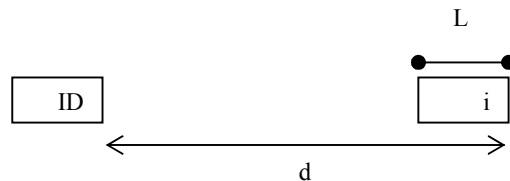
$$V_{MSS}(X, Y, ID, i, t) = V_{ID} = -a_{ID}\tau + \sqrt{a_{ID}^2\tau^2 - 2a_{ID}(L - d - \frac{V_i^2}{2a_i})}$$

طول هر سلول مطابق با وسایل نقلیه متداول در ایران حدود ۵ متر و عرض آن ۲ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین در مدل پیشنهادی ابعاد سلول هایی که آزادراه را تشکیل می دهند، 5×2 متر است. تا هر سلول مشخص کننده حداقل فضای باشد که یک وسیله نقلیه شخصی می تواند در آن قرار گیرد.

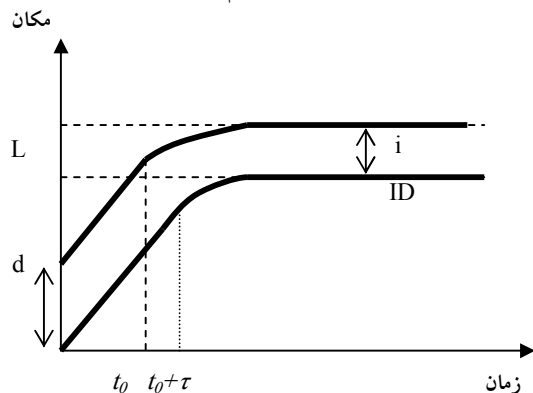
۲-۲ حداکثر سرعت ایمن در هر سلول

حداکثر سرعت ایمن در هر سلول عبارت است از حداکثر سرعتی که یک وسیله نقلیه فرضی در آن سلول می تواند به دست آورد، بدون آن که فاصله ایمن را نقض کند. برای محاسبه حداکثر سرعت ایمن در هر سلول، از قوانین حرکت مربوط به دو وسیله نقلیه فرضی که به دنبال هم حرکت می کنند، استفاده شده است [۱۰].

فرض کنید دو وسیله نقلیه i و ID با سرعت های V_i و V_{ID} به دنبال هم در حال حرکت هستند و فاصله بین آن دو با d و طول وسیله نقلیه با L مشخص شود. همچنین فرض می شود شتاب ترمز این دو وسیله نقلیه به ترتیب a_1 و a_2 باشد. شکل ۳ دو وسیله نقلیه که به دنبال هم در حرکت هستند و فواصل و اندازه های آنها را نشان می دهد.



شکل ۳. دو وسیله نقلیه که به دنبال هم در حرکت هستند.



شکل ۴. نمودار حرکت دو وسیله نقلیه

احتمال تصادف، احتمال حضور همزمان دو وسیله‌نقلیه در یک سلول است. برای تعیین احتمال حضور وسیله‌نقلیه i در سلول X_i با فرض این که موقعیت طولی و عرضی وسایل نقلیه مستقل از هم باشد، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$P(i, X_i, Y, t + \Delta t) = P(i, X_i, t + \Delta t) \cdot P(i, Y, t + \Delta t) \quad (9)$$

که در آن:

$$P(i, X_i, Y, t + \Delta t): \text{احتمال حضور وسیله‌نقلیه } i \text{ در سلول } (X_i, Y),$$

$$P(i, X_i, t + \Delta t): \text{احتمال حضور وسیله‌نقلیه } i \text{ در موقعیت طولی } X_i$$

در زمان $t + \Delta t$,

$$P(i, Y, t + \Delta t): \text{احتمال حضور وسیله‌نقلیه } i \text{ در موقعیت عرضی } Y$$

در زمان $t + \Delta t$ است.

برای تخمین موقعیت طولی وسایل نقلیه باید توجه کرد که رانندگان از سرعت وسایل نقلیه دیگر در بازه زمانی قبلی اطلاع دارند، ولی از این که سرعت وسایل نقلیه در بازه زمانی بعدی چه مقدار تغییر می‌کند، اطلاع ندارند. با توجه به این که تغییر سرعت، شتاب وسیله‌نقلیه را مشخص می‌کند، عدم قطعیت سرعت طولی وسایل نقلیه از جهت شتاب آنها به وجود می‌آید. به این ترتیب معادله حرکت طولی وسایل نقلیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X(i, t + \Delta t) = X(i, t) + V_x(i, t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a(i, t) \cdot \Delta t^2 \quad (10)$$

که در آن:

$$X(i, t): \text{موقعیت طولی وسیله‌نقلیه } i \text{ در زمان } t,$$

$$V_x(i, t): \text{سرعت طولی وسیله‌نقلیه } i \text{ در زمان } t,$$

$$a(i, t): \text{شتاب وسیله‌نقلیه } i \text{ در زمان } t \text{ است و از رابطه زیر به دست می‌آید:}$$

$$a(i, t) = \frac{V_x(i, t + \Delta t) - V_x(i, t)}{\Delta t} \quad (11)$$

با توجه به این که قسمت غیرقطعی حرکت طولی وسایل نقلیه شتاب آنها است، توزیع آماری شتاب وسیله‌نقلیه با استفاده از یک توزیع نرمال تخمین زده شده است. با فرض این که شتاب وسایل نقلیه دارای توزیع آماری $Normal(\mu_{a_{ix}}, \sigma_{a_{ix}})$ باشد، توزیع

که در رابطه فوق $V_{MSS}(X_i, Y, ID, i, t)$ حداکثر سرعت ایمن برای وسیله‌نقلیه ID در سلول X_i, Y در زمان t است.

۳-۲ میزان ریسک ایجاد شده

مدیریت ریسک یکی از ابزارهای سیاستگذاری است که با استفاده از بررسی و ارزیابی ریسکهای موجود در سیستم و با هدف جلوگیری از وقوع شرایط نامطلوب و یا کاهش اثر عوامل خطرزا یا به عبارتی کاهش ریسک به وجود آمده است. این ابزار به طور گسترده در سرمایه‌گذاریها، مدیریت پروژه و غیره کاربرد پیدا کرده است. در این پژوهش مدیریت ریسک برای توصیف رفتار حرکتی رانندگان بکار گرفته شده است.

برای بکارگیری مدیریت ریسک در توصیف رفتار حرکتی وسایل نقلیه لازم است مفاهیم پایه در این زمینه تعریف شوند. منظور از خطر در مدیریت ریسک عبارت است از موقعیتی که می‌تواند منجر به سانحه شود. در این تحقیق منظور از خطر بروز یک تصادف بین وسایل نقلیه است. ریسک ترکیبی از احتمال وقوع و خسارت است که در این تحقیق حاصلضرب احتمال وقوع و خسارت ناشی از تصادف به عنوان ریسک تعریف شده است. در این تحقیق خسارت همه تصادفات رانندگی برابر با یک در نظر گرفته شده است. از آنجا که در هر سلول احتمال تصادف با وسایل نقلیه متعددی وجود دارد، ریسک تصادف برای وسیله‌نقلیه ID در سلول (X_i, Y) در زمان t برابر با مجموع ریسک ایجاد شده در آن سلول از جانب وسایل نقلیه دیگر در نظر گرفته شده که با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

(۸)

$$R(ID, X_i, Y, t) = \text{Sum} \{IM(ID, X_i, Y, i, t) \cdot P(i, X_i, Y, t)\} \text{ for all } i \neq ID$$

که در آن:

$$R(ID, X_i, Y, t): \text{ریسک تصادف وسیله‌نقلیه } ID \text{ در سلول } (X_i, Y) \text{ در زمان } t,$$

$$P(i, X_i, Y, t): \text{احتمال حضور وسیله‌نقلیه } i \text{ در سلول } (X_i, Y) \text{ در زمان } t,$$

$IM(ID, X_i, Y, i, t)$: خسارت تصادف وسیله‌نقلیه ID با وسیله‌نقلیه i در سلول (X_i, Y) در زمان t است که در تمام موارد برابر و مساوی با یک در نظر گرفته می‌شود. تصادف هنگامی رخ می‌دهد که دو وسیله‌نقلیه در یک سلول قرار گیرند، بنابراین

با توجه به این که موقعیت هر سلول با مختصات مرکز آن سلول مشخص می‌شود و عرض هر سلول W_v است، حد بالا و حد پایین انتگرال محاسبه احتمال حضور وسیله‌نقلیه در سلول از $Y+W_v/2$ تا $Y-W_v/2$ تعیین شده است.

۳. جمع‌آوری اطلاعات از موقعیت وسایل نقلیه

در این پژوهش برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به موقعیت وسایل نقلیه یک سیستم پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفته که در آن موقعیت تک تک وسایل نقلیه در هر فریم از فیلم حرکت وسایل نقلیه مشخص می‌شود. در این سیستم امکان تشخیص موقعیت وسایل نقلیه بدون نیاز به تجهیزات خاص فیلمبرداری وجود دارد. همچنین بدون نیاز به دانستن زاویه و بزرگنمایی و ارتفاع دوربین در هنگام فیلمبرداری تنها با دانستن مختصات u نقطه از تصویر در جهان واقعی می‌توان فواصل و موقعیتهای خیابان را با دقت قابل قبولی اندازه‌گیری کرد [۱۰]. شکل ۵ مراحل مختلف پردازش تصاویر و تولید جدول موقعیت وسایل نقلیه را به صورت خلاصه نشان داده است.

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فیلم ویدئویی حرکت وسایل نقلیه تبدیل به عکسهایی از نوع Bitmap می‌شود، سپس مرحله کالیبراسیون دوربین برای انطباق عکس با موقعیت آن در جهان واقعی به انجام می‌رسد. سپس پردازش تصاویر برای تشخیص وسایل نقلیه در هر تصویر انجام می‌شود، پس از آن با استفاده از موقعیت وسایل نقلیه تشخیص داده شده در تصاویر مختلف، موقعیت هر وسیله‌نقلیه در سلسله تصاویر انطباق داده شده و در نهایت موقعیت هر یک از وسایل نقلیه در هر فریم مشخص می‌شود و در فایلی به نام d.txt به صورت جدول آرایه‌های (x, y, k, t, c) ذخیره می‌شود که در آن x و y موقعیت طولی و عرضی وسیله‌نقلیه، k نوع وسیله‌نقلیه از لحاظ بزرگ و کوچک بودن، t زمانی که وسیله‌نقلیه در آن موقعیت مشاهده شده است و c شماره مشخصه آن وسیله‌نقلیه است.

نرم‌افزار پردازش تصاویر تهیه شده قابلیت تشخیص وسایل نقلیه در شرایطی که تداخلی بین تصویر وسایل نقلیه وجود ندارد و تصویر وسایل نقلیه روی هم نمی‌افتد را دارد. اگر تصویر وسایل نقلیه روی هم بیفتند، باید با یک سری اصلاحات به صورت دستی، موقعیت وسایل نقلیه را به دست آورد [۱۰]. در این تحقیق دو محل در آزادراه تهران-کرج برای فیلمبرداری از

آمارای موقعیت طولی وسایل نقلیه دارای توزیع آماری زیر خواهد بود:

(۱۲)

$$X(i, t + \Delta t) \approx Normal_x(X(i, t) + V_x(i, t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \mu_{ax} \cdot \Delta t^2, \frac{1}{2} \sigma_{ax} \cdot \Delta t^2)$$

با توجه به توزیع آماری موقعیت طولی وسایل نقلیه، احتمال حضور وسیله‌نقلیه i در موقعیت X از رابطه زیر به دست می‌آید:

(۱۳)

$$P(i, X, t + \Delta t) = \int_{X - \frac{W_x}{2}}^{X + \frac{W_x}{2}} Normal_x(x, X(i, t) + N + V_x(i, t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \mu_{ax} \cdot \Delta t^2, \frac{1}{2} \sigma_{ax} \cdot \Delta t^2) \cdot dx$$

با توجه به این که موقعیت هر سلول با مختصات مرکز آن سلول مشخص می‌شود و طول هر سلول l_v است، حد بالا و حد پایین انتگرال محاسبه احتمال از $X+l_v/2$ تا $X-l_v/2$ تعیین شده است. برای تخمین موقعیت عرضی وسایل نقلیه باید توجه کرد رانندگان تغییر موقعیت عرضی وسایل نقلیه دیگر را نمی‌توانند پیش‌بینی کنند و به همین دلیل عدم قطعیت موقعیت عرضی وسایل نقلیه ناشی از سرعت عرضی آنها می‌باشد. معادله حرکت عرضی وسایل نقلیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Y(i, t + \Delta t) = Y(i, t) + V_y(i, t) \cdot \Delta t \quad (14)$$

که در آن $V_y(i, t)$ سرعت وسیله‌نقلیه i در زمان t است. اگر سرعت عرضی وسایل نقلیه دارای توزیع آماری $Normal_y(\mu_{vy}, \sigma_{vy})$ باشد، توزیع آماری موقعیت عرضی وسایل نقلیه دارای توزیع آماری زیر خواهد بود:

(۱۵)

$$Y(i, t + \Delta t) \approx Normal_y(Y(i, t) + \mu_{vy} \cdot \Delta t, \sigma_{vy} \cdot \Delta t)$$

با توجه به توزیع آماری موقعیت عرضی وسایل نقلیه، احتمال حضور وسیله‌نقلیه i در موقعیت عرضی Y از رابطه زیر به دست می‌آید:

(۱۶)

$$P(i, Y, t + \Delta t) = \int_{Y - \frac{W_y}{2}}^{Y + \frac{W_y}{2}} Normal_y(y, Y(i, t) + \mu_{vy} \cdot \Delta t, \sigma_{vy} \cdot \Delta t) \cdot dy$$

حرکت وسایل نقلیه انتخاب شد و در هر محل حدود نیم ساعت از وسایل نقلیه فیلمبرداری شد. برای کالیبره کردن مدل پیشنهادی از جدول موقعیت وسایل نقلیه استفاده شده است. آمار جمع‌آوری شده از یکی از دو محل به ترتیبی که گفته خواهد شد برای کالیبراسیون و دیگری برای اعتباریابی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

(۱۸)

$$V_y \sim Normal_x(\mu_{y3}, \sigma_{y3}) = Normal_x(0,3)$$

با استفاده از آزمون Kolmogrov-Smirnov مشخص شد که در سطح اطمینان ۹۹٪ توزیع به دست آمده نرمال است که نمایانگر توانایی رابطه فوق برای تخمین موقعیت عرضی وسایل نقلیه است. به همین ترتیب موقعیت طولی وسایل نقلیه نیز تخمین زده شده است. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از موقعیت طولی وسایل نقلیه در شرایط واقعی سرعت طولی هر وسیله نقلیه i در هر بازه زمانی $t, V_x(i, t)$ ، تعیین و با موقعیت همان وسیله نقلیه در زمان $t+\Delta t, V_x(t+\Delta t)$ ، مقایسه شده، سپس شتاب وسیله نقلیه i در زمان بین t و $t+\Delta t, a(i, t)$ ، به وسیله رابطه ۷ محاسبه می‌شود. $a(i, t)$ برای وسایل نقلیه مختلف i در بازه‌های زمانی مختلف t محاسبه شده و به این ترتیب a بر حسب متر بر مجذور ثانیه کالیبره شده و نشان داده شده که با استفاده از یک تابع توزیع نرمال از رابطه زیر قابل تخمین است:

(۱۹)

$$a \sim Normal_x(\mu_{ax}, \sigma_{ax}) = Normal_x(0,9)$$

۴. کالیبره کردن مدل پیشنهادی

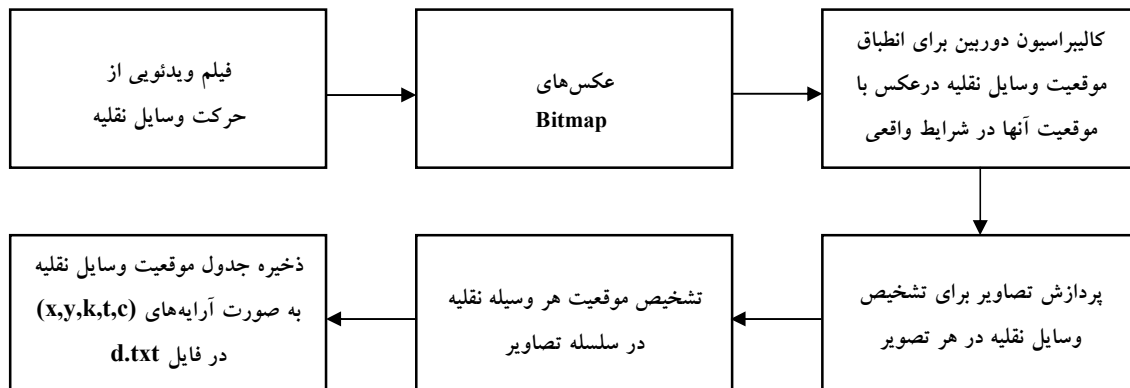
کالیبره کردن مدل پیشنهادی در دو قسمت انجام می‌شود که عبارتند از کالیبره کردن میزان ریسک تصادف، کالیبره کردن تابع حداکثر سرعت ایمن و کالیبره کردن ضرایب تابع مطلوبیت، در بخشهای بعد نحوه این کالیبراسیون ذکر شده است.

۴-۱ کالیبره کردن میزان ریسک تصادف

برای کالیبراسیون سرعت عرضی وسایل نقلیه، V_y ، اطلاعات جمع‌آوری شده از حرکت وسایل نقلیه در شرایط واقعی در محل اول آمارگیری مورد استفاده قرار گرفته است. موقعیت عرضی هر وسیله نقلیه i در هر بازه زمانی $t, Y(i, t)$ ، تعیین و با موقعیت همان وسیله نقلیه در زمان $t+\Delta t, Y(i, t+\Delta t)$ ، مقایسه شده، سپس سرعت عرضی وسیله نقلیه i در زمان t به وسیله رابطه زیر محاسبه شده است:

(۱۷)

$$V_y(i, t) = \frac{Y(i, t + \Delta t) - Y(i, t)}{\Delta t}$$



شکل ۵. مراحل مختلف پردازش تصاویر و تولید بانک اطلاعاتی

است. به این ترتیب با استفاده از رابطه ۲۵ آماره t_{po} برای سرعت متوسط وسایل نقلیه ۱/۶۹- به دست می‌آید. با توجه به این که $|t_{po}|=1.69 < t_{\alpha/2, n-1}=2.7$ دلیلی برای بی‌اعتبار بودن مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ برای محاسبه تعداد تغییر خط وجود ندارد. همان گونه که بیان شد اعتبار مدل پیشنهادی برای محاسبه سرعت متوسط و تعداد تغییر خط وسایل نقلیه تأیید می‌شود، بنابراین مدل پیشنهادی توانسته رفتار رانندگان را بر اساس تلاش آنان برای افزایش سرعت و کاهش ریسک تصادف مدلسازی کند.

۷. خلاصه و نتیجه‌گیری

تاکنون تحقیقات متعددی برای شبیه‌سازی رفتار حرکتی وسایل نقلیه در نقاط مختلف جهان انجام شده و نرم‌افزارهای متعددی نیز برای این کار تهیه شده است. در این تحقیق مدلی برای توصیف رفتار حرکتی رانندگان ارائه شده است که رفتار حرکتی رانندگان را بر مبنای یک فرآیند بهینه‌سازی جهت کاهش ریسک تصادف در هنگام رانندگی توصیف کرده است. مقایسه آمار برداشت شده از شرایط واقعی آزادراه تهران - کرج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی نمایانگر انطباق شرایط واقعی با مدل پیشنهادی است. بنابراین برای شبیه‌سازی خرد ترافیک در آزادراه‌های ایران می‌توان از این مدل به جای مدل‌های دیگر که بعضاً با رفتار حرکتی رانندگان در ایران مطابقت ندارند، استفاده کرد.

در حال حاضر با توجه به این که رانندگان در ایران به قوانین راهنمایی و رانندگی کمتر توجه می‌کنند، رفتار رانندگان به عنوان یک رفتار نامنظم مطرح شده و کمتر در خصوص مدلسازی و شبیه‌سازی آن تحقیق شده است. در این تحقیق نحوه تصمیم‌گیری رانندگان به خوبی مدل شده و به این ترتیب رفتار رانندگان از شکل نامنظم و تصادفی درآمده و به صورت مدلی برای افزایش سرعت و کاهش ریسک تصادف نشان داده شده است. به این ترتیب امکان بررسی عوامل مؤثر بر رفتار رانندگان فراهم شده و در تحقیقات بعدی می‌توان راهکارهای مناسب برای تغییر در رفتار رانندگان را پیشنهاد کرد.

در این پژوهش رفتار حرکتی رانندگان در قسمت اصلی آزادراه یعنی در قسمتهایی که تغییر خط رانندگان ناشی از مقصد آنها نیست مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحقیقات آینده

یکسان است و پس از آن آمار برداشت شده از موقعیت وسایل نقلیه در محیط واقعی و آنچه در محیط شبیه‌سازی پیش بینی شده است، قابل مقایسه می‌شوند. برای اعتباریابی مدل پیشنهادی، موقعیت طولی و عرضی وسایل نقلیه دو ثانیه بعد از ورود در محیط شبیه‌سازی با محیط واقعی در همان زمان مقایسه شده است.

تاکنون برای اعتباریابی مدل‌های شبیه‌ساز خرد ترافیک روشهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲ و ۱۳]، در این تحقیق مدل پیشنهادی در سطح خرد اعتباریابی شده است. برای اعتباریابی مدل پیشنهادی از آزمون مربوط به مشاهدات دوتایی استفاده شده است. آماره این آزمون از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{po} = \frac{\bar{d}}{S_d / \sqrt{n}} \quad (25)$$

که در آن:

t_{po} : آماره آزمون مشاهدات دوتایی،

\bar{d} : میانگین تفاضل‌های پارامتر مورد نظر در دوتایی‌های محیط شبیه‌سازی و شرایط واقعی،

S_d : انحراف معیار تفاضل‌های پارامتر مورد نظر در دوتایی‌های محیط شبیه‌سازی و شرایط واقعی،

n : تعداد نمونه مورد بررسی در محیط شبیه‌سازی و واقعی.

در این آزمون درجه آزادی برابر با $n-1$ است. اگر $|t_{po}| > t_{\alpha/2, n-1}$ باشد، یعنی مقدار قدر مطلق آماره آزمون از مقدار توزیع آماری $t_{student}$ برای دقت $\alpha/2$ و درجه آزادی $n-1$ بیشتر باشد، اعتبار مدل در سطح اطمینان $(1-\alpha)\%$ رد می‌شود و در غیر این صورت دلیلی برای بی‌اعتبار بودن مدل در آن سطح اطمینان وجود ندارد [۱۴].

در مدل پیشنهادی تفاضل میانگین سرعت متوسط وسایل نقلیه در محیط شبیه‌سازی و واقعی در ۶ بازه آمارگیری دارای میانگین ۰/۳ و واریانس ۵/۰۴ است. به این ترتیب با استفاده از رابطه ۲۵ آماره t_{po} برای سرعت متوسط وسایل نقلیه ۰/۳۶ به دست آمده است. با توجه به این که $|t_{po}|=0.36 < t_{\alpha/2, n-1}=2.7$ دلیلی برای بی‌اعتبار بودن مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ برای محاسبه سرعت متوسط وجود ندارد.

تفاضل میانگین تعداد تغییر خط وسایل نقلیه در محیط شبیه‌سازی و واقعی در ۶ بازه آمارگیری دارای میانگین ۱/۵- و واریانس ۵/۳

7.Sadat Hoseini, M., Shafahi,Y. and Vaziri, M. (2004) "Combination of car following and lane changing models as a drivers' optimization process", The 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation, ASCE, China, pp. 601-605.

8.Kim, S. (1992) "Statistics and decisions: An introduction to foundations", CRC Press.

9.AASHTO(1999) "Geometric design of highways and streets", US: AASHTO, p. 40.

۱۰. سادات حسینی، م. " بررسی رفتار حرکتی وسایل نقلیه در قسمت اصلی آزاد راه با استفاده از پردازش تصاویر"، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه شریف، ۱۳۸۷.

11.Sadat Hoseini, M. and Vaziri, M. (2006)"Using image processing for microsimulation of freeways in developing countries", Transportation Research Board, TRB.

12. Hoogendoorn, S., Ossen, S. and Gorte, B. (2006) "Inter-driver differences in car following: a vehicle trajectory based study", Transportation Research Board, TRB.

13. Brockfeld, E. , Kuhne. R. and Wagner, P. (2005)"Calibration and validation of microscopic models of traffic flow", Transportation Research Board, TRB.

14. Chung, C. (2003) "Simulation modeling hand book", CRC PRESS, pp 8.11 - 8.14.

می‌توان رفتار حرکتی وسایل نقلیه در تقاطعهای چراغدار و بدون چراغ، همچنین در رمپها را مورد بررسی قرار داد.

۸. منابع

1.Kachroo, P, and Ozbay, K. (1999) "Feedback control theory for dynamic traffic assignment", Springer, , pp. 19-43.

2.Kazi, Iftexhar,A.(1999) "Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior", Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

3.Barlovic, R., Esser, J. and Froese, K. (2005) "Online traffic simulation with cellular automata", <http://www.traffic.uni-duisberg.de>, Accessed, University of Duisburg Web Site.

4.Sultan, B. (2001) "The lane changing process: Data analysis & modeling behavior", Journal of Traffic Engineering and Control, pp. 202-207.

5.Shahab Uddin, M. and Ardekani, S. (2002) "An observation study of lane changing on basic freeway segment", Transportation Research Board (CD-ROM), 81st Annual Meeting.

6.Gunay, B. (1999) "Modeling lane discipline on multilane uninterrupted traffic flow", Traffic Engineering and Control, pp. 440-447.