

# معرفی شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری جهت تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب

سید صابر ناصرعلوی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس  
محمود صفارزاده (نویسنده مسئول)، استاد گروه راه و ترابری و حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس  
امیررضا ممدوحی، استادیار گروه حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس  
نوید ندیمی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس  
Email: Saffar\_m@modares.ac.ir

## چکیده

تعداد زیادی از تصادفات جلو به عقب در اثر خطای انسانی رخ می‌دهد. به کارگیری سیستم‌های پیشرفته دستیار راننده (ADAS) می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خطای انسانی داشته باشد. نکته اساسی در توسعه این سیستم‌ها تعریف یک شاخص مناسب جهت اعلام به موقع هشدار به رانندگان است. پیش از این، از شاخص زمان تا تصادف (TTC) در برخی از این سیستم‌ها استفاده شده است. اما این شاخص، قادر به تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب نیست. در حالی که شاخص سرفاصله‌زمانی (THDW) شاخص مناسبی جهت تشخیص موقعیت‌های با خطر برخورد بالقوه یا احتمالی می‌باشد. در این مقاله شاخصی به نام ترمزگیری اضطراری (UDI) پیشنهاد می‌شود که قادر به تعیین موقعیت‌های با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب (چند ثانیه زودتر نسبت به TTC) است. جهت تحلیل قیاسی، با استفاده از داده‌های خرد جریان ترافیک آزادراه I-80 پروژه NGSIM، و تعریف مقادیر آستانه مشخص برای شاخص‌های TTC، UDI و THDW؛ درصد موقعیت‌های بحرانی برای خودروهای درگیر فرآیند تعقیب در هر یک از ۶ خط آزادراه برای هر شاخص محاسبه می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که درصد فراوانی مدت زمان در خطر بودن وسایل نقلیه براساس شاخص‌های TTC، UDI و THDW در آزادراه I-80 به ترتیب برابر ۶۳، ۳ و ۷۶ درصد است. همچنین متوسط ضریب همبستگی موقعیت‌های بحرانی براساس شاخص‌های THDW و UDI در حدود ۰/۶۴۴ است. بنابراین نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که، شاخص UDI نسبت به شاخص TTC توانایی بیشتری در تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب دارد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی ترافیک، زمان تا تصادف، ترمزگیری اضطراری، تصادف جلو به عقب

## ۱. مقدمه

به‌طورکلی هم تجهیزات ایمنی مورد استفاده و هم روش‌های تحلیل ایمنی را می‌توان به دو گروه کنش‌پذیر<sup>۱</sup> و کنش‌ور<sup>۲</sup> تقسیم کرد. گروهی از تجهیزات ایمنی مورد استفاده در خودرو نظیر کمربند ایمنی و کیسه هوا با هدف کاهش آثار منفی و شدت تصادفات و گروه دیگری از این تجهیزات نظیر سیستم‌های پیشرفته دستیار راننده (ADAS)<sup>۳</sup> با هدف کاهش خطای انسانی و در نتیجه کاهش تعداد تصادفات، طراحی می‌شوند. گروه اول به تجهیزات کنش‌پذیر و گروه دوم کنش‌ور معروف هستند [۱]. نظیر این تقسیم‌بندی در روش‌های ارزیابی ایمنی معابر هم وجود دارد و این روش‌ها نیز به دو گروه کنش‌پذیر و کنش‌ور تقسیم‌بندی می‌شوند. در رویکرد کنش‌پذیر که سابقه نسبتاً طولانی‌تری دارد، هدف، تعیین نقاط حادثه‌خیز با استفاده از آمار تصادفات رخ داده و استفاده از مدل‌های آماری نظیر بیزین است [۲].

عمده تحقیقات در زمینه ایمنی ترافیک بر مبنای روش‌های کنش‌پذیر یا آمار تصادفات ترافیک جاده‌ای صورت گرفته [۳-۶] و از آنها به‌عنوان مثال در توسعه مدل‌های پیش‌بینی تصادفات [۴، ۷، ۸] و بررسی شدت تصادفات [۹-۱۱] استفاده می‌شود. تعدادی مطالعات، به‌علت برخی مشکلات مربوط به روش تحلیل ایمنی ترافیک مبتنی بر تاریخچه تصادفات [۱۲-۱۵]، روش‌های کنش‌ور را به‌وسیله ارزیابی تداخلات ترافیکی [۱۶-۱۹] یا شاخص‌های ایمنی جایگزین [۲۰-۲۴] پیشنهاد کردند. از روش‌های کنش‌ور در کاربردهای مختلفی از جمله: تحلیل یا بهبود وضعیت ایمنی ترافیک زمان واقعی [۲۱، ۲۵-۲۸]، توسعه سیستم‌های هشداردهی درون‌خودرویی [۲۹-۳۱] و تحلیل مقایسه‌ای وضعیت ایمنی گزینه‌های مختلف (با داده‌های واقعی یا خروجی شبیه‌سازی) [۱۹، ۲۲-۲۴] می‌توان استفاده کرد.

امروزه انواع مختلفی از سیستم‌های ADAS با کارایی‌های مختلف وجود دارد. سیستم‌هایی نظیر کنترل سیر تطبیقی (ACC)؛ تطابق سرعت هوشمند (ISA)؛ و سیستم درون‌خودرویی هشدار جهت جلوگیری از تصادف (IVCAWS)؛ وظیفه کنترل خودرو با هدف جلوگیری از تصادف جلو به عقب برعهده دارند

[۳۲]. نکته اساسی در توسعه این سیستم‌ها تعریف یک شاخص مناسب جهت اعلام به‌موقع هشدار به رانندگان است [۱، ۳۳، ۳۴]. از شاخص زمان تا تصادف (TTC)<sup>۴</sup> پیش از این در برخی سیستم‌ها نظیر IVCAWS استفاده شده [۲، ۳۵، ۳۶]. طبق تعریف، TTC برابر زمان مانده تا برخورد بین دو خودرو است، در صورتی که مسیر و اختلاف سرعت آنها تا زمان برخورد ثابت حفظ شود [۳۷].

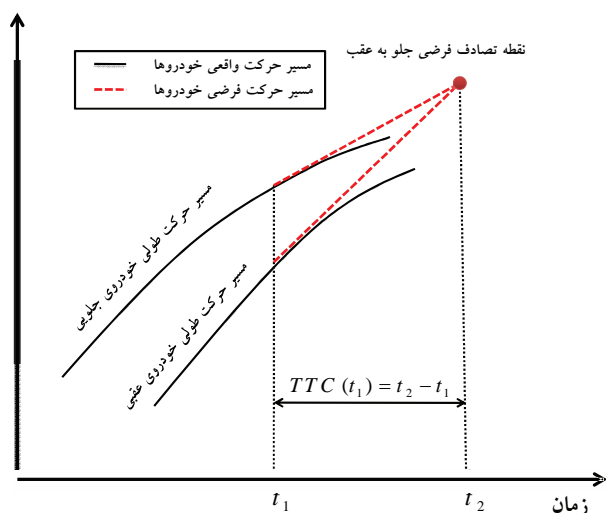
ارزیابی ایمنی ترافیک می‌تواند از دو دیدگاه محافظه‌کارانه و ریسک‌پذیر صورت پذیرد. دیدگاه اول مبتنی بر احتمال تغییر شرایط، در آینده‌ای نزدیک همراه با وخیم‌تر شدن اوضاع است. اما دیدگاه ریسک‌پذیر به بررسی ایمنی در هر لحظه با فرض ثابت ماندن شرایط موجود می‌پردازد. استفاده از شاخص‌های ایمنی نظیر TTC، در تحلیل ایمنی ترافیک منطبق بر دیدگاه دوم می‌باشد. شاخص TTC، در حالتی که سرعت خودروی تعقیب‌کننده کمتر از خودروی جلویی باشد قابل تعریف نیست [۲۴]. در حالی که، چنانچه سرفاصله‌زمانی (THDW) در این حالت کم باشد احتمال برخورد جلو به عقب در صورت اعمال ترمز از طرف خودروی جلویی، وجود دارد [۲۲]. لذا، نیاز به شاخص جدیدی است که توانایی برآورد خطر برخورد جلو به عقب، با تغییر احتمالی شرایط در آینده نزدیک، در هر لحظه داشته باشد. چرا که THDW در حین حرکت خودروها در هر لحظه قابل محاسبه نمی‌باشد.

در این مقاله، شاخصی به نام ترمزگیری اضطراری (UDI) با استفاده از مفهوم فاصله توقف ایمن خودروها در جریان پیشنهاد می‌شود. جهت ارزیابی کمی توانایی این شاخص در تعیین موقعیت‌های با پتانسیل برخورد جلو به عقب با تعریف مقادیر آستانه بحرانی برای شاخص‌های THDW، TTC و شاخص پیشنهادی UDI درصد موقعیت‌های بحرانی در مدت زمان تعقیب خودرو در هر خط (به-ترتیب TEHP\*، TETP\* و TEUP\*) محاسبه می‌شود. همچنین از ضریب همبستگی شاخص‌های TETP\* و TEHP\* برای اطمینان از کارایی شاخص UDI در تعیین خطر بالقوه برخورد جلو به عقب استفاده می‌گردد.

## معرفی شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری جهت تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب

$I_L =$  طول خودروی جلویی.

شکل ۱، به صورت شماتیک مفهوم TTC را نشان می‌دهد. در لحظه  $t_1$ ، سرعت خودروی عقبی بیشتر از خودروی جلویی است. چنانچه این دو خودرو با همین سرعت مسیر خود را ادامه دهند ثانیه دیگر  $(t_2 - t_1)$  باهم برخورد خواهند کرد.



شکل ۱. نمایش شماتیک TTC [۲۴]

### ۲-۲ شاخص ایمنی $TET^A$

در صورت تعریف یک مقدار آستانه یا بحرانی مشخص برای TTC، می‌توان از طول مدت زمان در معرض مقادیر زیر بحرانی قرارگرفتن TTC، در طول دوره زمانی تعقیب خودرو (H) به عنوان یک شاخص ایمنی استفاده کرد. این شاخص جمع تمامی لحظاتی است که راننده به خودروی جلویی با مقادیر TTC کمتر از مقدار بحرانی نزدیک می‌شود. بنابراین هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد ایمنی موقعیت تعقیب خودرو بالاتر خواهد بود [۲۴].

چنانچه خط سیر خودروها در مقطعی به طول  $L$ ، در مدت زمان تعقیب H، وجود داشته باشد، می‌توان دیاگرام تغییرات TTC، نسبت به زمان را برای هر خودرو نظیر شکل ۲ در بازه تعقیب خودرو رسم نمود. مطابق این دیاگرام، از لحظه  $t = 0$  تا  $t_1$  راننده خودروی عقبی به یک خودرو با سرعت پایین تر نزدیک می‌شود، بنابراین مقدار TTC کاهش می‌یابد. در لحظه

این مقاله ۵ بخش دارد. در بخش دوم، مرور ادبیات تحقیق شامل شاخص THDW، TTC و ارتباط این دو شاخص، استفاده از شاخص TTC در سیستم‌های جلوگیری از تصادف (IVCAWS) می‌باشد. در بخش سوم، روش تحقیق مربوط به چگونگی توسعه شاخص جدید UDI با استفاده از مفهوم فاصله توقف ایمن می‌باشد. نتایج تحلیل‌ها شامل محاسبه درصد زمانی درخطر بودن خودروهای درگیر فرآیند تعقیب با استفاده از شاخص‌های THDW، TTC و UDI، در بخش چهارم ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی در بخش پنجم آمده است.

### ۲. مرور ادبیات تحقیق

این بخش به مرور ادبیات تحقیق شامل شاخص‌های TTC و THDW و ارتباط این دو شاخص با یکدیگر، پیشینه استفاده از شاخص TTC در سیستم‌های جلوگیری از تصادف (IVCAWS) و نحوه محاسبه مدت زمان درخطرگرفتن خودروها با استفاده از شاخص TTC می‌پردازد.

### ۱-۲ شاخص زمان تا تصادف

شاخص زمان تا تصادف (TTC)، نخستین بار توسط Hayward در سال ۱۹۷۲ به عنوان زمان باقیمانده تا برخورد بین دو خودرو در صورتی که مسیر و اختلاف سرعت آنها ثابت فرض شود، معرفی شد [۳۷]. این شاخص درحالی که سرعت خودروی تعقیب‌کننده بیش از خودروی جلویی باشد قابل تعریف است (رابطه ۱):

$$TTC = \frac{x_L(t) - x_F(t) - I_L}{V_F(t) - V_L(t)} \quad \forall V_F(t) > V_L(t) \quad (1)$$

که در آن،

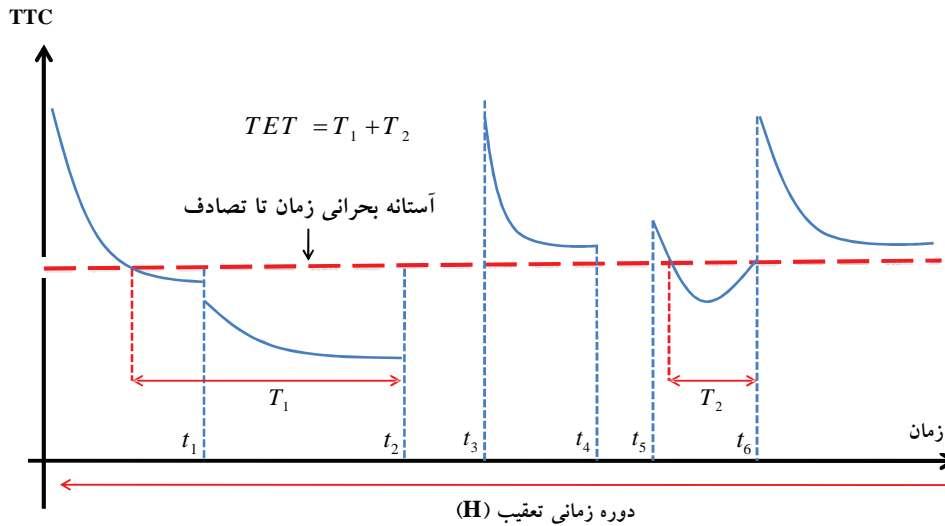
TTC = شاخص زمان تا تصادف،

$X_L =$  مکان خودروی جلویی،

$X_F =$  مکان خودروی عقبی،

$V_F =$  سرعت خودروی عقبی،

$V_L =$  سرعت خودروی جلویی و



شکل ۲. تغییرات TTC نسبت به زمان و نحوه محاسبه شاخص TET

از آنجا که گاهی داده‌ها به‌طور گسسته جمع‌آوری می‌شود، مقادیر TTC نیز به‌تبع آن به‌طور گسسته محاسبه می‌شود. برای اهداف محاسباتی، فرض می‌شود که مقدار TTC محاسبه شده در یک لحظه  $t$ ، در یک بازه زمانی کوتاه  $\tau_{SC}$  (نظیر ۰/۱ ثانیه)، تغییر نکند.

در نتیجه برای بازه زمانی  $H$  در نظر گرفته شده، دوره  $T = \frac{H}{\tau_{SC}}$  زمانی، در محاسبات وجود دارد ( $t = 0, \dots, T$ ). بنابراین در حالت گسسته برای محاسبه شاخص TET با توجه به شکل ۲ داریم:

$$TET_F^* = \sum_{t=0}^T \delta(t) \cdot \tau_{SC} \quad (2)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \\ 1 & \forall 0 \leq TTC_F(t) \leq TTC^* \end{cases} \quad (3)$$

که در این رابطه‌ها:

$TET_F^*$ : طول مدت زمانی که راننده خودروی عقبی با TTC کمتر از بحرانی ( $TTC^*$ ) حرکت می‌کند.

$\delta$ ، پارامتر متغیری است، با مقدار ۱، در حالتی که راننده خودروی عقبی در لحظه  $t$ ، با TTC کمتر از مقادیر بحرانی به خودروی جلویی نزدیک می‌شود و صفر در شرایطی که مقدار TTC بیشتر از مقدار آستانه بحرانی باشد. واحد شاخص TET، ثانیه است.

$t_1$  خودرو هدف (عقبی) تصمیم به تغییر خط می‌گیرد. هم‌اکنون این خودرو با خودروی جدیدی در جلو خود با فاصله طولی کمتر روبه‌رو می‌شود. در نتیجه مقادیر TTC کوچک‌تر و به مقادیر ناایمن نزدیک‌تر می‌شود. در فاصله زمانی  $t_1$  و  $t_2$  TTC قابل تعریف نیست. چرا که خودروی جلویی با سرعت بالاتری نسبت به خودروی عقبی در حال حرکت است. اما در  $t_2$  خودروی هدف به خودروی جلویی بار دیگر نزدیک می‌شود. این بار خودروی مورد نظر بدون تغییر سرعت به خودروی جلویی نزدیک می‌شود، بنابراین مقادیر TTC کاهش می‌یابد. این رفتار نوسانی و تغییر سرعت‌ها به علت رفتار تعقیب خودرو است [۲۴].

### TET مخفف Time Exposed Time to Collision

این شاخص طول مدت زمانی است که مقادیر شاخص TTC، در طول دوره تعقیب  $H$  کمتر از مقادیر آستانه بحرانی است. این شاخص در واقع مجموع تمام لحظاتی است که راننده خودروی عقبی در فرآیند تعقیب به خودروی جلویی با مقادیر TTC زیر بحرانی یا  $TTC^*$  نزدیک می‌شود. بنابراین هر چه مقدار شاخص TET در یک فرآیند تعقیب برای خودروی عقبی کمتر باشد، فرآیند تعقیب ایمنی بیشتری دارد.

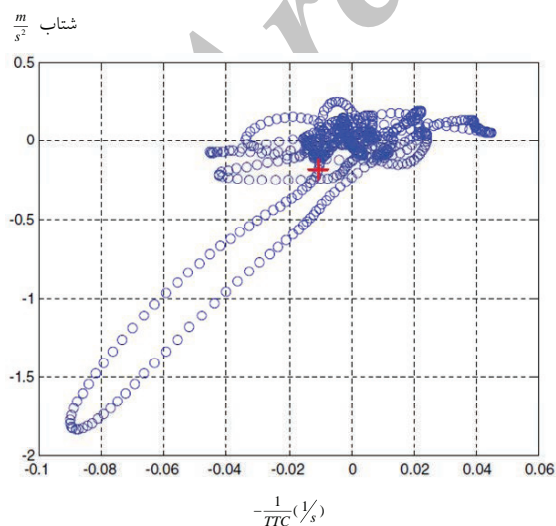
محاسبه شاخص TET، نیاز به جمع‌آوری داده‌های سرعت و مکان همه خودروهایی دارد که به مقطع مورد نظر وارد می‌شوند.

## معرفی شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری جهت تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب

۲-۴ استفاده از TTC در سیستم‌های هوشمند جلوگیری از

### تصادف

مهم‌ترین مسأله در توسعه سیستم‌های جلوگیری از تصادف (IVCAWS)، تعریف یک راهبرد هشداردهی جهت شناسایی موقعیت خطرناک است، به طوری که بتواند پیش از زمان در خطر قرار گرفتن خودرو به موقع، راننده را از وضعیت موجود آگاه کند. با توجه به اهمیت TTC، تاکنون تحقیقات متعددی با هدف به‌کارگیری این شاخص در سیستم‌های کنترل خودکار خودرو و یا سیستم‌های هوشمند جلوگیری از تصادفات جلو به عقب صورت گرفته است. به‌طور مثال Zheng و McDonald در بخشی از تحقیقات خود به بررسی رابطه میان TTC و شتاب اعمال شده توسط رانندگان پرداختند [۱]. با توجه به اینکه TTC در زمان صفر شدن سرعت نسبی دو خودرو بی‌نهایت می‌شود، این پژوهشگران از پارامتر  $\frac{1}{TTC}$  برای بررسی رابطه میان TTC و شتاب خودرو استفاده کردند. نتایج تجربی حاصل از این تحقیقات در شکل ۴ دیده می‌شود. با مثبت شدن TTC یا به عبارت دیگر بیشتر شدن سرعت خودروی عقبی، این خودرو احساس خطر کرده و شتاب منفی از خود نشان می‌دهد. به تدریج با کاهش شاخص TTC (افزایش  $\frac{1}{TTC}$ )، مقدار شتاب منفی اعمال شده از طرف رانندگان هم بیشتر می‌شود.



شکل ۴. رابطه میان شاخص زمان تا تصادف و شتاب خودرو [۱]

اندیس \* نشان‌دهنده محاسبه TET با استفاده از مقدار آستانه بحرانی TTC\* است.

جهت تعیین درصد زمانی در خطر بودن هر خودرو در طول فرآیند تعقیب، می‌توان از رابطه ۴، استفاده کرد:

$$TETP^* = 100 \cdot \left( \frac{TET_F^*}{H} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه:

$TETP^*$ : درصد زمانی در خطر بودن هر خودرو،

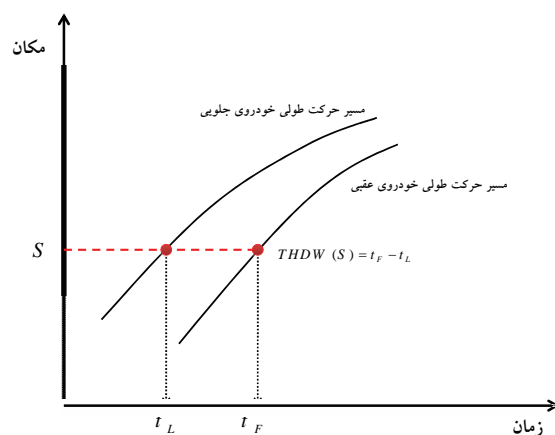
H: طول دوره تعقیب خودرو.

### ۲-۳ سرفاصله زمانی

سرفاصله زمانی (THDW)، به‌عنوان زمان سپری شده بین عبور جلوی خودروی جلویی از مقطعی از جاده تا عبور جلوی خودروی عقبی از همان نقطه از جاده تعریف می‌شود (رابطه ۵). از این شاخص، جهت تخمین بحرانی بودن یک موقعیت تعقیب خودرو استفاده می‌شود [۲۲].

$$THDW = t_F - t_L \quad (5)$$

که در آن  $t_F$  زمانی است که جلوی خودروی عقبی از یک مقطع مشخص راه عبور می‌کند و  $t_L$  زمانی است که خودروی جلوی از همان جایی از همان مکان عبور کند. شکل ۳ مفهوم این شاخص را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳. شماتیک مفهوم THDW

## ۲-۵ مقایسه شاخص TTC با THDW

Vogel، با مقایسه THDW و TTC به عنوان شاخص‌های ایمنی نشان داد که در فرآیند تعقیب خودرو THDW به لحاظ ایمنی یک مرحله دورتر از TTC است [۲۲]. بدین ترتیب که خودروی عقبی می‌تواند برای مدت زمان طولانی با THDW کوچک حرکت کند، حال آنکه شاخص TTC بزرگ و حتی غیر قابل تعریف باشد. در این حالت، مادامی که تغییری در فرآیند تعقیب خودرو اتفاق نیفتد (مثلاً خودروی جلویی ترمز بگیرد) هیچ خطری وجود ندارد. برعکس، چنانچه شاخص TTC کوچک باشد برای جلوگیری از تصادف جلوه‌عقب، بایستی تغییراتی در فرآیند تعقیب خودرو اتفاق بیفتد (مثلاً خودروی عقبی ترمز بگیرد) در غیر این صورت برخورد جلوه‌عقب قطعی است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت THDW نشان‌دهنده خطر بالقوه و TTC نشان‌دهنده خطر قریب‌الوقوع است. جدول ۱ ارتباط شاخص TTC با THDW را به خوبی نشان می‌دهد [۲۲].

جدول ۱. ارتباط بین TTC و THDW در ایمنی [۲۲]

THDW			
بزرگ	کوچک		
غیر ممکن	خطر حتمی	کوچک	TTC
ایمن	خطر بالقوه (احتمالی)	بزرگ	

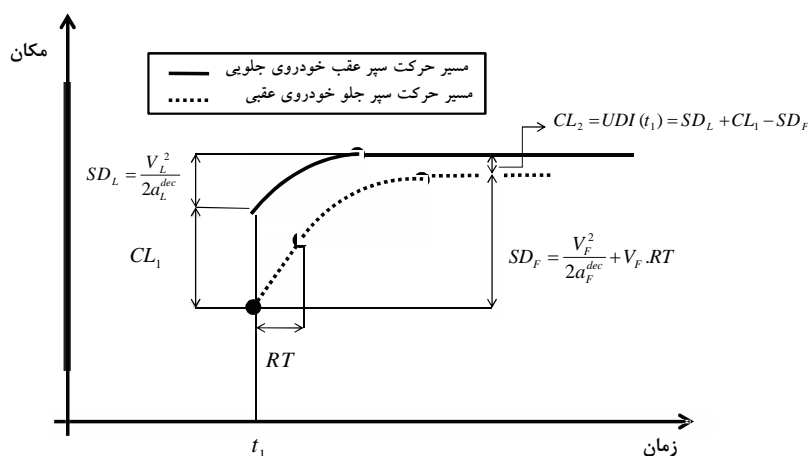
### ۳. روش تحقیق

در فرآیند تعقیب خودرو آخرین نقطه‌ای که راننده می‌تواند با اعمال ترمز از تصادف جلوگیری نماید، نقطه خطر نامیده می‌شود. بعد از گذر از این نقطه، در صورت انجام هر نوع عکس‌العملی از طرف راننده، تصادف اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین، لازم است در مدت زمان کافی قبل از این نقطه به راننده هشدار داده شود. در فرآیند تعقیب خودرو، ممکن است در یک دوره زمانی به علت کم‌بودن THDW، خطر بالقوه (احتمالی) تصادف جلوه‌عقب وجود داشته باشد در حالی که شاخص TTC در

این دوره زمانی، مقداری بزرگ و یا غیر قابل تعریف (سرعت خودروی عقبی کمتر از جلویی) باشد. در این حالت، چنانچه خودروی جلویی ترمز بگیرد؛ شاخص TTC قابل تعریف شده و رو به کاهش خواهد بود. بنابراین، اگر اعلام هشدار به راننده با تأخیر همراه باشد، رخداد تصادف محتمل‌تر است. در نتیجه، شاخص TTC قادر به تشخیص به موقع تصادفات جلوه‌عقب نخواهد بود. از طرف دیگر، محاسبه دقیق THDW برای یک خودرو در هر لحظه امکان‌پذیر نبوده و تنها در مقاطع معینی از آزادراه قابل محاسبه است.

با توجه به اهمیت مقوله ایمنی ترافیک، معرفی شاخصی که این ضعف را برطرف کند، ضروری است. در این مقاله شاخص جدیدی به نام ترمزگیری اضطراری (UDI)<sup>۹</sup> معرفی می‌شود که اساس آن مبتنی بر مفهوم مسافت توقف ایمن است. مسافت توقف ایمن، فاصله لازم جهت ممانعت از برخورد خودروی عقبی با خودروی جلویی در هنگام اعمال ترمز و توقف خودروی جلویی است. شکل ۵ مفهوم شاخص UDI را به سبب منحنی خط سیر یک جفت خودرو نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، اگر خودروی جلویی در لحظه  $t_1$  به‌طور ناگهانی با بیشترین شتاب ممکن ترمزگیری کند، پس از طی مسافت  $SD_L^{10}$  (رابطه ۶) به‌طور کامل متوقف می‌گردد. با فرض اینکه خودروی عقبی در لحظه  $t_2$  با تأخیری معادل  $RT^{11}$  پس از لحظه اعمال ترمز خودروی جلویی جهت جلوگیری از برخورد جلوه‌عقب با بیشترین شتاب ممکن ترمز بگیرد و چنانچه فرض شود در طول این مدت (از لحظه  $t_1$  تا  $t_2$ ) خودروی عقبی با سرعت ثابت حرکت کند، خودروی عقبی نهایتاً پس از طی مسافت  $SD_P^{12}$  (رابطه ۷) متوقف می‌گردد. اگر در ابتدا فاصله سپر جلو خودروی تعقیب‌کننده تا سپر عقب خودروی جلویی معادل  $CL_1^{13}$  فرض شود؛ حال پس از توقف کامل دو خودرو، این فاصله آزاد بین خودرویی معادل  $CL_P^{13}$  خواهد شد که به‌عنوان شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری، UDI، در نظر گرفته می‌شود. برای اجتناب از برخورد این دو خودرو مقدار UDI بایستی در هر لحظه مثبت باشد؛ در غیر این صورت، شرایط تعقیب خودرو در آن لحظه

معرفی شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری جهت تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب



شکل ۵. مفهوم شاخص UDI با استفاده از خط سیر خودروهای در حالت تعقیب

که در این رابطه:

TEUP\* = درصد زمانی در خطر قرارگرفتن خودروی عقبی، با استفاده از شاخص UDI.

THDW به عنوان شاخص ایمنی، قادر به تعیین موقعیت‌های با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب است. برای اطمینان از کارایی شاخص UDI در تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه تصادف جلو به عقب، این شاخص با THDW مقایسه می‌شود. به همین دلیل، مجموع مدت زمانی که در طول فرآیند تعقیب خودرو THDW از آستانه مشخصی کمتر باشد؛ با شاخص جدیدی به نام TEH\* نشان داده می‌شود. با تقسیم TEH\* بر مدت زمان تعقیب خودرو مشخص می‌شود که با شاخص THDW چند درصد زمان تعقیب خودرو ناایمن بوده است (رابطه ۱۰).

$$TEHP^* = 100 \cdot \left( \frac{TEH^*}{H} \right) \quad (10)$$

که در این رابطه:

TEHP\* = درصد زمانی در خطر قرارگرفتن خودروی عقبی، با استفاده از شاخص THDW.

محاسبه شاخص‌های ایمنی TTC و UDI، با استفاده از داده‌های پروژه NGSIM<sup>۱۱</sup>، شامل داده‌های خرد جریان ترافیک آزادراه I-۸۰ در Emeryville، ایالت کالیفرنیا انجام می‌گیرد. تصویر مقطع مورد مطالعه به طور شماتیک در شکل ۶ دیده می‌شود. مقطع مورد مطالعه آزادراه، شامل ۶ خط عبوری بوده و

غیرایمن محسوب می‌شود (رابطه ۸).

$$SD_L = \frac{V_L^2}{2a_L^{dec}} \quad (6)$$

$$SD_F = \frac{V_F^2}{2a_F^{dec}} + V_F \cdot RT \quad (7)$$

$$UDI = SD_L + CL_1 - SD_F \quad (8)$$

UDI = شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری،

$a_L^{dec}$  = ماکزیمم شتاب ترمزگیری خودروی جلویی،

$a_F^{dec}$  = ماکزیمم شتاب ترمزگیری خودروی عقبی،

$CL_1$  = فاصله آزاد طولی بین دو خودرو،

$RT$  = زمان عکس‌العمل راننده خودروی عقبی و

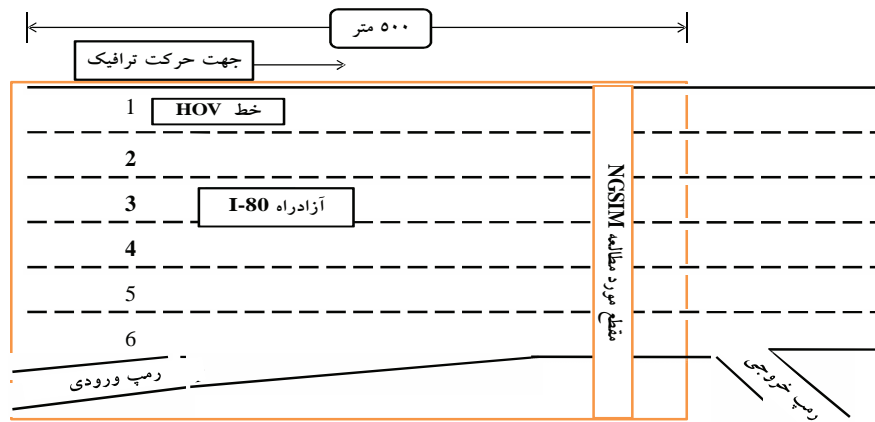
$SD_i$  = مسافت توقف خودرو  $i$  (خودروی جلویی:  $L_i$ ، خودروی

عقبی:  $F$ ).

با بهره‌گیری از مفهوم شاخص TET\*، می‌توان در یک بازه تعقیب خودرو  $H$ ، مجموع مدت زمانی که شاخص UDI کوچک‌تر از صفر است را با شاخص جدیدی به نام TEU\* نشان داد. با تقسیم TEU\* بر مدت زمان تعقیب خودرو می‌توان گفت، در کل چند درصد از زمان تعقیب خودرو ناایمن بوده است (رابطه ۹).

$$TEUP^* = 100 \cdot \left( \frac{TEU^*}{H} \right) \quad (9)$$

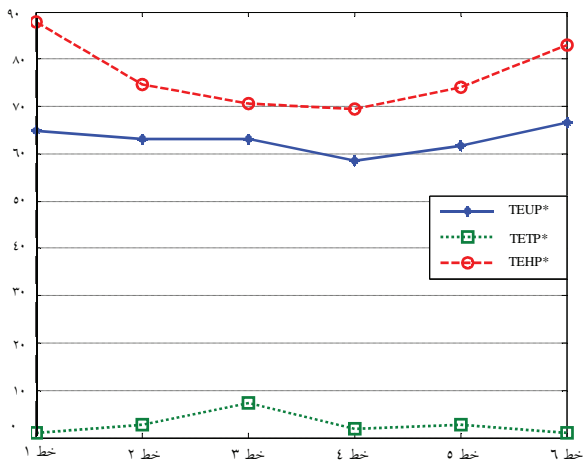




شکل ۶. شماتیک مقطع مورد مطالعه، آزادراه I-۸۰

#### ۴. نتایج محاسبات

شاخص‌های THDW و UDI از دیدگاه محافظه‌کارانه و شاخص TTC از دیدگاه ریسک‌پذیر، به ارزیابی ایمنی می‌پردازند. در واقع شاخص UDI وضعیت ایمنی را در بدبینانه‌ترین حالت و TTC در حالتی به نسبت خوشبینانه نشان می‌دهد. لذا انتظار می‌رود درصد موقعیت‌های خطرناک، تشخیص داده شده توسط THDW و UDI به مراتب بیشتر از TTC باشد. شکل ۷ نشان می‌دهد که از کل زمان تعقیب خودرو در هر خط به طور متوسط چند درصد آن در حالت زیر بحرانی بوده است. جزئیات این نتایج در جدول ۲ به طور کامل آمده است.



شکل ۷. درصد زمانی موقعیت‌های خطرناک براساس شاخص‌های THDW، UDI، و TTC در خطوط مختلف

حدود ۵۰۰ متر طول دارد. این مقطع شامل یک ریمپ ورودی نیز می‌باشد. خط (۱)، آزادراه مربوط به وسایل نقلیه با سرنشین بالا (HOV) است. داده‌های خرد جریان ترافیک در این آزادراه مربوط به یک ربع ساعت (از ساعت ۴:۰۰ تا ۴:۱۵ بعد از ظهر) بوده و در سال ۲۰۰۵ جمع‌آوری شده است. این داده‌ها مربوط به خط‌سیر عبور ۲۰۵۲ خودرو و شامل حدود ۱۳۰۰۰۰۰ رکورد اطلاعات بوده که هر رکورد حاوی اطلاعات وضعیت حرکتی یک خودرو در یک لحظه مشخص می‌باشد [۳۸]. از بین کل این داده‌ها، از خودروهای درگیر فرآیند تعقیب در هر خط، به عنوان خودروهای در معرض رخداد تصادف جلوه‌به‌عقب استفاده می‌شود.

برای محاسبه شاخص‌های TEUP\*، TETP\*، و TEHP\* فرضیات معقول زیر در نظر گرفته شده است. زمان عکس‌العمل رانندگان مقدار ثابت ۲ ثانیه و آستانه بحرانی TTC و THDW ۳ ثانیه و بیشترین شتاب منفی اعمال شده توسط هر خودرو صرف‌نظر از نوع آن مقدار ثابت ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه فرض می‌شود. با توجه به روابط ذکر شده در قبل مقادیر شاخص‌های TEUP\*، TETP\*، و TEHP\* برای هر خودرو در طول فرآیند تعقیب خودرو محاسبه می‌گردد. برای مقایسه ایمنی خطوط مختلف و همچنین مقایسه این شاخص با یکدیگر، مقدار متوسط هر شاخص در هر خط محاسبه می‌شود.



## معرفی شاخص ایمنی ترمزگیری اضطراری جهت تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب

جدول ۲. درصد زمانی موقعیت‌های خطرناک براساس شاخص‌های THDW، UDI و TTC در خطوط مختلف

میانگین نتایج برای آزادراه	شماره خط عبور					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
TEHP*	۸۸	۷۳	۷۰	۶۹	۷۴	۸۳
TEUP*	۶۵	۶۳	۶۳	۵۸	۶۱	۶۷
TETP*	۱	۳	۸	۲	۳	۱

با شاخص TEUP\* نیز صادق است. در مقابل نتایج مربوط به شاخص TETP\* کاملاً متفاوت است به طوری که در خطوط مختلف نتایج به هیچ وجه همگن نبوده و خط (۳) بحرانی ترین خط به لحاظ خطر برخورد جلو به عقب است. با در نظر گرفتن همبستگی شاخص‌های TEUP\* و TEHP\* در خطوط مختلف آزادراه و مقایسه نتایج سه شاخص TEUP\*، TETP\* و TEHP\* در مجموع می توان گفت، شاخص UDI، نظیر THDW قادر به تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب است. با وجود برتری شاخص UDI نسبت به شاخص TTC در تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه (احتمالی)، این شاخص نیز دارای محدودیت‌هایی است. جدول ۴ مقایسه میان شاخص‌های THDW، UDI و TTC در ارزیابی ایمنی آزادراه را نشان می دهد.

ضریب همبستگی شاخص‌های TEUP\* و TEHP\* برای مقایسه شاخص UDI و THDW در هر خط آزادراه در جدول ۳ آورده شده است

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

در فرآیند تعقیب خودرو لازم است تا در مدت زمان کافی قبل از رخداد تصادف جلو به عقب، به راننده جهت انجام عکس العمل مناسب هشدار داده شود. برای این منظور از سیستم‌های جلوگیری از تصادف استفاده می شود. نکته اساسی در توسعه این سیستم‌ها، تعریف یک شاخص ایمنی مناسب جهت اعلام صحیح و به موقع هشدار به رانندگان است. پیش از این از شاخص TTC، در سیستم‌های جلوگیری از تصادف استفاده شده است. اما نتایج تحلیل‌ها نشان می دهد که این شاخص در برخی موارد قادر به تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب نخواهد بود، بنابراین در این مقاله شاخص جدید UDI با استفاده از مفهوم فاصله توقف ایمن توسعه داده شد. با توجه به توانایی شاخص THDW

جدول ۳. ضریب همبستگی شاخص‌های UDI و THDW در خطوط مختلف آزادراه

میانگین نتایج برای آزادراه	شماره خط					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ضریب همبستگی	۰/۵۶۹	۰/۷۱۲	۰/۵۵۱	۰/۷۸۲	۰/۵۶۹	۰/۶۷۷
	۰/۶۴۴					

مقایسه شاخص TEHP\* در خطوط مختلف نشان می دهد، که تغییرات این شاخص در کلیه خطوط تقریباً یکنواخت و همگن است. به همین ترتیب تغییرات TEUP\* نیز در کلیه خطوط یکنواخت است. براساس شاخص TEHP\*، خط (۴) به لحاظ پتانسیل برخورد جلو به عقب ایمن ترین است. این نکته در رابطه

جدول ۴. مقایسه شاخص‌های ایمنی THDW، UDI و TTC

شاخص ایمنی	کاربرد	عیب عمده
THDW	تشخیص موقعیت‌های با خطر احتمالی برخورد	مشکل بودن محاسبه دقیق THDW به طور لحظه‌ای و خطای زیاد در تشخیص موقعیت‌های ناایمن
UDI	تشخیص موقعیت‌های با خطر احتمالی برخورد	خطای زیاد در تشخیص موقعیت‌های ناایمن
TTC	تشخیص موقعیت‌های با خطر قطعی برخورد	نادیده گرفتن موقعیت‌های با خطر احتمالی برخورد جلو به عقب

آستانه بحرانی برای شاخص‌های TTC و UDI در دوره تعقیب خودرو، می‌تواند موضوعات تحقیقات آتی باشد.

## ۶. پانویس‌ها

- 1- Passive
- 2- Active
- 3- Advanced Driver Assistance System (ADAS)
- 4- Adaptive Cruise Control (ACC)
- 5- Intelligent Speed Adaptation (ISA)
- 6- In Vehicle Collision Avoidance Warning System (IVCAWS)
- 7- Time to Collision (TTC)
- 8- Time Exposed Time to Collision (TET)
- 9- Urgent Deceleration Index (UDI)

۱۰- فاصله توقف ایمن خودروی جلویی

۱۱- زمان عکس‌العمل

۱۲- فاصله توقف ایمن خودروی عقبی

۱۳- فاصله طولی بین دو خودرو

14- Next Generation Simulation (NGSIM)

15- High Occupancy Vehicle (HOV)

## ۷. مراجع

- [1] P. J. Zheng and M. McDonald, "Manual vs. adaptive cruise control - Can driver's expectation be matched?," *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, vol. 13, pp. 421-431, Oct-Dec 2005.
- [2] J. Jeffrey and R. Gray, "Comparison of driver brake reaction times to multimodal rear-end collision warninig," in *Proceedings of the fourth International driving Symposium on human factors in driver assessment, Training and Vehicle design*, 2005.
- [3] B. J. Park, D. Lord, and J. D. Hart, "Bias properties of Bayesian statistics in finite mixture of negative binomial regression models in crash data analysis," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, pp. 741-749, Mar 2010.

در تشخیص موقعیت‌های با خطر بالقوه (احتمالی) برخورد جلو به عقب در مدت زمان کافی قبل از رخداد تصادف، از این شاخص برای سنجش کارایی شاخص جدید UDI استفاده شد. در نهایت با انجام تحلیل‌ها نتایج زیر استنتاج می‌شود:

الف- شاخص ایمنی UDI با THDW همبسته است. با توجه به اینکه امکان محاسبه THDW در هر لحظه از فرآیند تعقیب خودرو وجود ندارد، از شاخص UDI می‌توان در تعیین موقعیت‌های تعقیب خودرو با خطر بالقوه برخورد جلو به عقب در سیستم‌های جلوگیری از تصادف (IVCAWS) استفاده کرد. بدین ترتیب، می‌توان در مدت زمان کافی قبل از نقطه خطر به راننده، جهت انجام عکس‌العمل مناسب هشدار داد.

ب- اگرچه شاخص UDI در تشخیص به موقع تصادفات جلو به عقب نسبت به شاخص TTC، توانایی بیشتری دارد؛ اما استفاده از این شاخص همراه با خطای زیادی در سیستم جلوگیری از تصادف خواهد بود به نحوی که کارایی این سیستم‌ها را کاهش می‌دهد.

ج- نتایج مربوط به تحلیل ایمنی با استفاده از ۳ شاخص THDW، TTC و UDI در خطوط مختلف آزادراه I-80 نشان می‌دهد که دو شاخص THDW و UDI تا حد زیادی با یکدیگر متناسب است، در حالی که این نتایج با شاخص TTC به هیچ وجه سازگار نیست. این مسأله نشان می‌دهد، که این شاخص‌ها به ارزیابی ایمنی آزادراه از دو دیدگاه مختلف ریسک‌پذیر و محافظه‌کار می‌پردازند.

د- استفاده از تنها یک شاخص در سیستم‌های هوشمند جلوگیری از تصادف رویکرد چندان مناسبی نیست. شاخص TTC در اعلام به موقع خطر ضعیف است. از طرفی استفاده از شاخص UDI، با تعداد دفعات زیاد اعلام هشدار و ایجاد مزاحمت برای راننده همراه است. اما با به کارگیری همزمان این دو شاخص و تعریف راهبردهای هشداردهی به شکل‌های گوناگون می‌توان فرآیند تعقیب خودرو را بدون رخداد تصادف جلو به عقب مدیریت کرد. چگونگی استفاده همزمان این دو شاخص و یا شاخص‌های دیگر در سیستم‌های هوشمند جلوگیری از تصادف و چگونگی تعریف

- [12] J. I. Barancik and D. Fife, "Discrepancies in vehicular crash injury reporting: Northeastern Ohio Trauma Study," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 17, pp. 147-54, 1985.
- [13] W. A. Evans and A. J. Courtney, "An Analysis of Accident Data for Franchised Public Buses in Hong Kong," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 17, pp. 355-366, 1985.
- [14] C. M. Farmer, "Reliability of Police-Reported Information for Determining Crash and Injury Severity," *Traffic Injury Prevention*, vol. 4, pp. 38-44, 2003.
- [15] F. M. Streff and C. Christoff, "Validity and Reliability of Police-reported Crash Data: The New Michigan UD-10," University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan 1995.
- [16] K. Ismail, T. Sayed, N. Saunier, and C. Lim, "Automated Analysis of Pedestrian-Vehicle Conflicts Using Video Data," *Transportation Research Record*, pp. 44-54, 2009.
- [17] R. Ellis and R. Van Houten, "Reduction of Pedestrian Fatalities, Injuries, Conflicts, and Other Surrogate Measures in Miami-Dade, Florida Results of Large-Scale FHWA Project," *Transportation Research Record*, pp. 55-62, 2009.
- [18] X. S. Wang and M. Abdel-Aty, "Modeling left-turn crash occurrence at signalized intersections by conflicting patterns," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, pp. 76-88, Jan 2008.
- [19] F. F. Saccomanno, F. Cunto, G. Guido, and A. Vitale, "Comparing Safety at Signalized Intersections and Roundabouts Using Simulated Rear-End Conflicts," *Transportation Research*
- [4] K. Haleem, M. Abdel-Aty, and K. Mackie, "Using a reliability process to reduce uncertainty in predicting crashes at unsignalized intersections," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, pp. 654-666, Mar 2010.
- [5] B. J. Park and D. Lord, "Application of finite mixture models for vehicle crash data analysis," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 41, pp. 683-691, Jul 2009.
- [6] T. Yamamoto, J. Hashiji, and V. N. Shankar, "Underreporting in traffic accident data, bias in parameters and the structure of injury severity models," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, pp. 1320-1329, Jul 2008.
- [7] A. Montella, "A comparative analysis of hotspot identification methods," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, pp. 571-581, Mar 2010.
- [8] S. Mitra and S. Washington, "On the nature of over-dispersion in motor vehicle crash prediction models," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 39, pp. 459-468, May 2007.
- [9] S. Y. Jung, X. Qin, and D. A. Noyce, "Rainfall effect on single-vehicle crash severities using polychotomous response models," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, pp. 213-224, Jan 2010.
- [10] A. Das and M. Abdel-Aty, "A genetic programming approach to explore the crash severity on multi-lane roads," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, pp. 548-557, Mar 2010.
- [11] J. M. Ma, K. M. Kockelman, and P. Damien, "A multivariate Poisson-lognormal regression model for prediction of crash counts by severity, using Bayesian methods," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, pp. 964-975, May 2008.

and Advanced Computing Applications, pp. 83-91, 2006.

[28] M. Abdel-Aty, J. Dilmore, and A. Dhindsa, "Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 38, pp. 335-345, Mar 2006.

[29] W. B. Zhang, S. E. Shladover, and Y. Zhang, "Evaluation of forward collision warning system for urban driving," *Transportation Research Record*, pp. 106-113, 2007.

[30] P. J. Zheng, M. McDonald, and J. P. Wu, "Evaluation of collision warning-collision avoidance systems using empirical driving data," *Intelligent Transportation Systems and Vehicle-Highway Automation 2006*, pp. 1-7, 2006.

[31] H. Krishnan, S. Gibb, A. Steinfeld, and S. Shladover, "Rear-end collision-warning system - Design and evaluation via simulation," *Advanced Traveler Information Systems, Warning Systems and Intelligent Vehicles*, pp. 52-60, 2001.

[32] S. P. Hoogendoorn, "ADAS Safety Impact on Rural and Urban Highways," in *Annual Meeting Transportation Research Board*, 2005

[33] V. Horst, "Time-To-Collision as a cue for decision-making in braking," in Gale, A.G. et al. (Eds.), *Vision in Vehicles III* Amsterdam Elsevier Science Publishers B.V., 1991, pp. 19-26.

[34] J. Lee, D. McGehee, T. Brown, and M. Reyes, "Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Response to Imminent Rear-End Collision in a High-Fidelity Driving Simulator," *University of Iowa* 2002.

Record, pp. 90-95, 2008.

[20] K. Ozbay, H. Yang, B. Bartin, and S. Mudigonda, "Derivation and Validation of New Simulation-Based Surrogate Safety Measure," *Transportation Research Record*, pp. 105-113, 2008.

[21] C. Oh, S. Park, and S. G. Ritchie, "A method for identifying rear-end collision risks using inductive loop detectors," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 38, pp. 295-301, Mar 2006.

[22] K. Vogel, "A comparison of headway and time to collision as safety indicators," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 35, pp. 427-433, May 2003.

[23] D. Gettman and L. Head, "Surrogate safety measures from traffic simulation models," *Statistical Methods and Modeling and Safety Data, Analysis, and Evaluation*, pp. 104-115, 2003.

[24] M. M. Minderhoud and P. H. L. Bovy, "Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 33, pp. 89-97, Jan 2001.

[25] C. Oh, J. Oh, and J. Min, "Real-Time Detection of Hazardous Traffic Events on Freeways Methodology and Prototypical Implementation," *Transportation Research Record*, pp. 35-44, 2009.

[26] A. Pande and M. Abdel-Aty, "Comprehensive analysis of the relationship between real-time traffic surveillance data and rear-end crashes on freeways," *Safety Data, Analysis, and Evaluation*, pp. 31-40, 2006.

[27] J. N. Hourdos, V. Garg, P. G. Michalopoulos, and G. A. Davis, "Real-time detection of crash-prone conditions at freeway high-crash locations," *Artificial Intelligence*

[35] P. E. An and C. J. Harris, "An intelligent driver warning system for vehicle collision avoidance," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, vol. 26, pp. 254–258, 1996.

[36] A. Touran, M. A. Brackstone, and M. McDonald, "A collision model for safety evaluation of autonomous intelligent cruise control," Accident Analysis and Prevention, vol. 31, pp. 567-578, Sep 1999.

[37] J. C. Hayward, "Near miss determination through use of a scale of danger," in Highway Research Board (traffic records 384) Washington, DC., 1972.

[38] NGSIM, <http://ngsim.fhwa.dot.gov>: Next generation simulation, June 5, 2009.

Archive of SID