

# استفاده از شاخص زمان تا تصادف برای بهبود برازش مدل تعقیب خودروی GHR در حالت شتاب منفی

سید صابر ناصرعلوی<sup>۱\*</sup>، محمود صفارزاده<sup>۲</sup>، نوید ندیمی<sup>۳</sup>، امیر رضا ممدوحی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد گروه راه و ترابری و حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس

۳- کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استادیار گروه حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس

saber\_alavi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۱/۱۲

**چکیده-** مدل‌های تعقیب خودرو در مطالعات مختلف از جمله: تحلیل ظرفیت، تحقیقات ایمنی، شبیه‌سازی جریان ترافیک و توسعه سیستم‌های کنترل خودکار خودروها کاربرد دارند. در طول شش دهه اخیر، مدل‌های تعقیب خودرو توسعه زیادی یافته که معروف‌ترین مدل تعقیب خودروی محرک-محور، مدل GHR است. محرک در این مدل، اختلاف سرعت دو خودروی درگیر در فرایند تعقیب خودرو است که در این مقاله، پیشنهاد جایگزینی آن با شاخص زمان تا تصادف در موقعیت شتاب منفی به‌عنوان عاملی گویاتر ارائه می‌شود. برای مقایسه‌ی مدل پیشنهادی با مدل پایه از داده‌های واقعی جریان ترافیک آزادراه I-80 پروژه NGSIM استفاده می‌شود. انتخاب نمونه مناسب از داده‌های پروژه NGSIM با تعیین زمان واکنش لحظه‌ای برای هر راننده در طول فرایند تعقیب خودرو انجام می‌شود. نتایج مدل‌سازی در دو حالت مختلف حاکی از افزایش ضریب تعیین مدل ( $R^2$ ) از ۰/۲۳۳ در حالت پایه به ۰/۶۳۱ در مدل پیشنهادی است. همچنین نتیجه تحلیل روندگرایی برآورد-مشاهده برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی (با ضریب تعیین ۰/۸۸۳) قابل قبول ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که در تحلیل رفتار رانندگان در مدل‌های تعقیب خودرو، شاخص زمان تا تصادف نسبت به متغیر اختلاف سرعت، از توضیح‌دهندگی بیش‌تری دارد.

**کلیدواژه‌گان:** شاخص زمان تا تصادف، مدل تعقیب خودرو، پرداخت مدل، پروژه NGSIM

## ۱- مقدمه

تحقیقات ایمنی، شبیه‌سازی جریان ترافیک و توسعه سیستم‌های کنترل خودکار خودروها کاربرد فراوان دارد [۳]. تصادفات جلوه‌عقب با فراوانی تقریبی ۱/۵ میلیون در سال حدود ۲۳ درصد از کل تصادفات خودروها در سطح ایالات متحده را تشکیل می‌دهند [۴]. بررسی و شناسایی

مدل‌های تعقیب خودرو به تحلیل اندرکنش میان دو خودروی پشت‌سرهم واقع در خط عبور مشابه و در یک جریان ترافیک نسبتاً متراکم می‌پردازند [۲و۱]. بررسی رفتار رانندگان در فرایند تعقیب خودرو در تحلیل ظرفیت،

بحث می‌شود. در نهایت، بخش ۵ به ارائه نتایج و پیشنهادات برای مطالعات مشابه می‌پردازد.

## ۲- مرور ادبیات

برای نشان‌گذاری، با فرض این‌که خودروی  $n$  به دنبال خودروی  $n-1$  در حرکت باشد (شکل ۱)، متغیرهای  $x$ ،  $v$  و  $a$  به ترتیب معرف مکان، سرعت و شتاب است. برای هر یک از این متغیرها، عدد داخل پرانتز،  $t$  یا  $t + \Delta t$ ، نمایانگر زمان و زیرنویس،  $n$  یا  $n-1$ ، شماره خودرو را نشان می‌دهد. بنابراین،  $a_n(t + \Delta t)$  نمایانگر شتاب خودروی  $n$  در زمان  $t + \Delta t$  است.

### ۲-۱- مدل GHR

شکل ابتدایی مدل GHR ابتدا در اواخر دهه ۱۹۵۰ به وسیله گروهی از محققین آزمایشگاه تحقیقاتی GM طراحی شد و به تدریج و در طی پنج مرحله توسعه پیدا کرد. اساس هر مدل به شکل زیر است [۱]:

$$\text{واکنش خودروی تعقیب کننده در زمان } (t + \Delta t) =$$

حساسیت راننده خودروی تعقیب کننده\* محرک از سوی خودروی جلویی در زمان  $(t)$

در این مدل فرض می‌شود که شتاب خودروی تعقیب کننده متناسب با محرک یعنی نرخ نزدیک شدن آن به خودروی جلویی (یا همان اختلاف سرعت) است [۱]. رابطه (۱) مدل تعقیب خودروی GHR را با پارامتر حساسیت  $\alpha$  نشان می‌دهد. در این رابطه، عبارت داخل آکولاد، حساسیت و عبارت داخل کروشه، محرک مدل GHR را نشان می‌دهند [۱ و ۲].

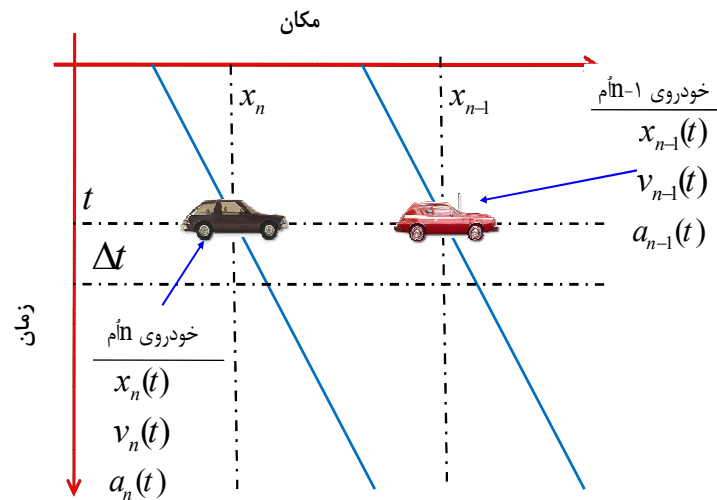
$$a_n(t + \Delta t) = \left\{ \frac{\alpha (v_n(t + \Delta t))^m}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l} \right\} [v_{n-1}(t) - v_n(t)] \quad (1)$$

رفتار تعقیب خودرو و نحوه تصمیم‌گیری رانندگان، نقش مهمی در توسعه سیستم‌های اجتناب از تصادف پیشرفته و در نهایت، اجتناب از این نوع برخوردها دارد.

در طی ۶۰ سال اخیر، مدل‌های تعقیب خودرو توسعه زیادی پیدا کرده است. به طور کلی، این مدل‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- مدل‌های محرک-محور؛ ۲- مدل‌های مبتنی بر حفظ فاصله ایمن و ۳- مدل‌های روانی-جسمانی [۵]. نخستین مدل محرک-محور با عنوان مدل GM<sup>۱</sup> یا GHR<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۸ توسط Chandler، Herman و Montroll در آزمایشگاه تحقیقاتی جنرال موتورز (GM) ارائه شد [۱ و ۲ و ۶]. مدل‌های پیچیده تعقیب خودرو نسبت به مدل‌های ساده‌تر لزوماً نتایج قابل قبول‌تری نمی‌دهند؛ بنابراین در عین قدیمی بودن، مدل GHR، همچنان یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌هاست که تحلیل‌های مختلفی روی آن انجام می‌شود [۶]. برای مثال، مدل TEXAS<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی تعقیب خودرو در تقاطعات و مدل MITSIM<sup>۴</sup> برای شبیه‌سازی جریان ترافیک از مدل GHR در مطالعات شبیه‌سازی استفاده می‌کنند [۷].

در این مقاله، استفاده از شاخص زمان تا تصادف به جای سرعت نسبی به عنوان محرک برای بهبود برازش مدل GHR پیشنهاد می‌شود. بخش ۲ به مرور ادبیات مرتبط با توسعه مدل GHR، سابقه پرداخت مدل و چگونگی استفاده از شاخص زمان تا تصادف در برخی مدل‌های روانی-جسمانی می‌پردازد. در ادامه، در بخش ۳، روش پرداخت مدل GHR با داده‌های NGSIM<sup>۵</sup> و استفاده از مفهوم واکنش لحظه‌ای شرح داده می‌شود؛ سپس در بخش ۴ با استفاده از نتایج رگرسیون مدل پیشنهادی و مدل پایه، در ارتباط با علت بهبود مدل،

- 1- General Motors (GM)
- 2- Gazis- Herman-Rothery (GHR)
- 3- Traffic Experimental and Analytical Simulation (TEXAS)
- 4- Microscopic Traffic Simulator (MITSIM)
- 5- Next Generation Simulation (NGSIM)



شکل (۱) نشان‌گذاری حرکت دو خودروی پشت‌سرهم در یک خط عبور

جدول (۱) پیشینه کالیبراسیون مدل GHR با رویکردهای مختلف

| ردیف | مرجع | رویکرد | $l^*$      | $m^*$      |
|------|------|--------|------------|------------|
| ۱    | [۱]  | کلان   | ۲/۸        | ۰/۸        |
| ۲    | [۱]  | کلان   | ۲/۴        | ۰/۶        |
| ۳    | [۱]  | خرد    | ۰          | ۰          |
| ۴    | [۱]  | خرد    | ۱          | ۰          |
| ۵    | [۱]  | خرد    | **۱/۶، ۲/۵ | **۰/۲، ۰/۷ |
| ۶    | [۱]  | خرد    | **۰/۲، ۱   | **۰/۲، ۰/۹ |
| ۷    | [۳]  | خرد    | ۱/۰۱       | ۱/۱۱       |
| ۸    | [۷]  | کلان   | **۰/۶، ۰/۵ | **۲/۱، ۱/۹ |
| ۹    | [۷]  | خرد    | **۰/۷، ۰/۳ | **۲/۵، ۲/۷ |

\* پارامترهای مدل GHR.

\*\* پرداخت پارامترها برای دو حالت شتاب مثبت و شتاب منفی انجام شده است.

## ۲-۲- شاخص زمان تا تصادف (TTC)

زمان تا تصادف (TTC) <sup>۱</sup> نخستین بار به وسیله‌ی Hayward در سال ۱۹۷۲ به‌عنوان زمان باقیمانده تا برخورد بین دو خودرو در صورتی که مسیر و اختلاف سرعت آن‌ها حفظ شود، معرفی شد [۸]. طبیعی است که این شاخص هنگامی

در این رابطه :

 $a_n =$  شتاب خودرو عقبی؛ $v_n =$  سرعت خودرو عقبی؛ $v_{n-1} =$  سرعت خودرو جلوئی؛ $x_n =$  مکان خودرو عقبی؛ $x_{n-1} =$  مکان خودرو جلوئی؛ $m, l, \alpha =$  پارامترهای کالیبراسیون مدل و $\Delta t =$  زمان عکس‌العمل خودرو عقبی.

دو ضعف اصلی مدل GHR عبارتند از: ۱- استفاده از

سرعت نسبی به‌عنوان تنها محرک مدل و ۲- تناقض میان

نتایج مطالعات مختلف پرداخت مدل [۳]. تاکنون تحقیقات

زیادی با هدف پرداخت و ارزیابی مدل GHR با

رویکردهای کلان و خرد و با استفاده از روش‌های متنوعی،

از جمله: رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی، الگوریتم

ژنتیک و غیره انجام شده است. جدول ۱ خلاصه مهم‌ترین

تحقیقات انجام شده در این باره را نشان می‌دهد. همان‌طور

که جدول ۱ نشان می‌دهد، اعداد بسیار متفاوتی برای

پارامترهای مدل حاصل شده است.

### 1- Time-to-Collision (TTC)

معتبر است که سرعت خودروی تعقیب‌کننده بیش از خودروی جلویی باشد (رابطه ۲):

$$TTC_i = \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{i-1}}{v_n(t) - v_{n-1}(t)} \quad \forall v_n(t) > v_{n-1}(t) \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $l_{i-1}$  طول خودروی جلویی است و سایر متغیرها مثل قبل تعریف می‌شوند.

شکل ۲ به صورت شماتیک مفهوم TTC را نشان می‌دهد. در لحظه  $t_1$  سرعت خودرو عقبی بیش‌تر از خودرو جلویی است. چنانچه این دو خودرو با همین سرعت به مسیر خود ادامه دهند  $t_2 - t_1 = TTC$  ثانیه بعد با هم برخورد می‌کنند.

مرور ادبیات حاکی از اهمیت شاخص TTC در پیش‌بینی رفتار رانندگان در فرایند تعقیب خودرو است و پیش از این در برخی مدل‌های تعقیب خودروی روانی - جسمانی از این شاخص استفاده شده است [۹ و ۱۰]، شاخص TTC در فرایند تعقیب خودرو عامل مهمی در انتخاب فاصله بین یک خودرو با خودروی جلویی و انجام واکنش مناسب به وسیله‌ی راننده است (رابطه ۳) [۱۰]. در

رابطه ۳، هرچه  $TTC_{est}$  کوچک‌تر باشد، مقدار  $a_i$  بزرگ‌تر می‌شود و چنانچه مقدار  $TTC_{est}$  از عدد مشخصی بیش‌تر شود،  $a_i$  صفر می‌شود. رابطه ۴، رابطه میان TTC تخمین زده شده به وسیله‌ی راننده و TTC واقعی را نشان می‌دهد. در این رابطه، مقدار پارامترهای  $e$  و  $f$ ، به ترتیب،  $1/0.4$  و  $0.72$  تخمین زده شد [۱۰].

$$a_i = cTTC_{est} + d + \varepsilon \quad (3)$$

$$TTC_{est} = eTTC^f \quad (4)$$

$a_i$ : شتاب منفی اعمال شده از طرف راننده خودروی تعقیب‌کننده (واکنش)  $(m/s^2)$ ؛

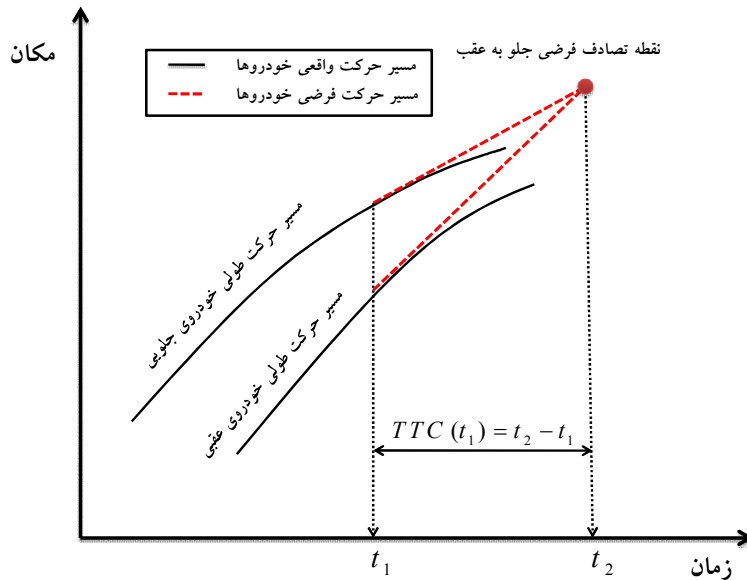
$TTC_{est}$ : زمان تا تصادف تخمین زده شده به وسیله‌ی راننده خودروی تعقیب‌کننده (محرک) (sec)؛

TTC: زمان تا تصادف واقعی (محرک) (sec)؛

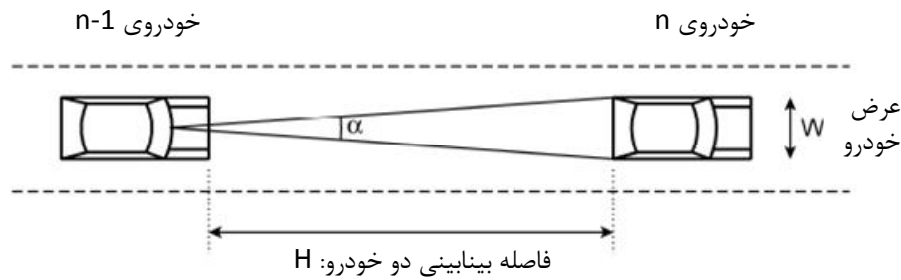
$c$ : عدد ثابت؛

$d$ : عدد ثابت منفی و

$\varepsilon$ : خطای اتفاقی.



شکل (۲) نمایش شماتیک TTC



شکل (۳) پارامترهای مؤثر در مدل تعقیب خودرو [۹]

### ۲-۳- جمع‌بندی ادبیات

مدل‌های تعقیب خودرو به تحلیل اندرکنش میان دو خودروی پشت‌سرهم واقع در یک خط عبور می‌پردازند. مبنای مدل‌های محرک-محور در مدل‌های تعقیب خودرو، پاسخ راننده خودروی تعقیب‌کننده (خودروی عقبی) به محرک پاسخ است که محرک در مدل GHR، اختلاف سرعت است. اما در موقعیت‌های ترافیکی واقعی، به‌ویژه در حالت‌های شتاب منفی، راننده‌ها نه تنها به اختلاف سرعت بلکه به ریسک تصادف جلو به عقب درک شده ناشی از اختلاف سرعت پاسخ می‌دهند. به عبارت دیگر، خودروی تعقیب‌کننده خودروی جلویی را براساس سطح ریسک درک شده از اختلاف سرعت و فاصله مکانی تعقیب می‌کند. از طرف دیگر، شاخص TTC پارامتر مهمی است که به نظر می‌رسد در حالت بیش‌تر بودن سرعت خودروی تعقیب‌کننده از خودروی جلویی، روی رفتار و نحوه تصمیم‌گیری راننده تعقیب‌کننده تأثیر مستقیم می‌گذارد.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- داده‌های ترافیکی واقعی

داده‌های ترافیکی به‌کاررفته در این تحقیق از وب‌سایت<sup>۱</sup> شبیه‌سازی نسل آینده (NGSIM) به‌دست آمد. برخی خصوصیات NGSIM عبارتند از [۱۱]:

- با حمایت مالی اداره راه ایالات متحده (FHWA)<sup>۲</sup>
- با هدف توسعه الگوریتم‌های رفتاری در شبیه‌سازی خرد
- مجموعه داده‌های بسیار دقیق و با جزئیات جمع‌آوری شده از سال ۲۰۰۵ میلادی به بعد
- قابل دسترس همه محققین علاقمند (قابل دانلود رایگان)
- بازبینی و اعتبارسنجی مدل‌های ترافیکی ده‌ها مقاله
- شامل چهار مجموعه داده‌ای از آزادراه‌ها و شریانی‌ها:
- آزادراه I-80 در Emeryville، کالیفرنیا (۳ تا ربع ساعت).
- آزادراه US-101 در لس‌آنجلس، کالیفرنیا (۳ تا ربع ساعت).
- شریانی بلوار Lankershim در لس‌آنجلس، کالیفرنیا (۲ تا ربع ساعت).
- شریانی خیابان Peachtree در آتلانتا، جورجیا (۲ تا ربع ساعت).
- ضبط موقعیت خودروها در هر یک‌دهم ثانیه با استفاده از دوربین‌های با دقت بالا
- علاوه بر جزئیات خط‌سیرهای خودروها، دارای داده‌های شناساگر و سایر داده‌های تکمیلی
- پرداخت مدل با استفاده از داده‌های پروژه NGSIM، شامل داده‌های خرد جریان ترافیک آزادراه I-80 در Emeryville، ایالت کالیفرنیا انجام می‌گیرد. داده‌های ترافیکی مربوط به

2- Federal Highway Administration (FHWA)

1- <http://ngsim.fhwa.dot.gov>

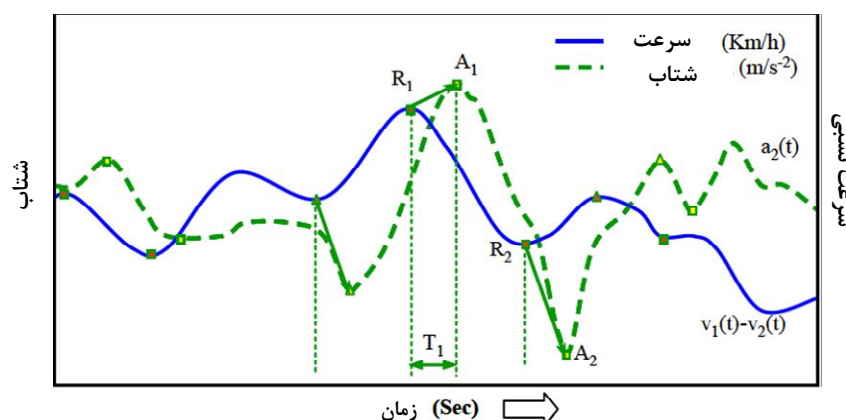
در این پژوهش برای در نظر گرفتن تغییرات رفتاری بین رانندگان، به جای استفاده از یک مقدار زمان واکنش ثابت، از زمان واکنش لحظه‌ای رانندگان استفاده شد. برای این منظور، Gurusinghe برای تخمین زمان عکس‌العمل لحظه‌ای، یک روش گرافیکی پیشنهاد می‌دهد [۱۴ و ۱۵]. ابتدا محرک و پاسخ برای تنها یک سری زمانی فرایند تعقیب خودرو در یک نمودار واحد ترسیم می‌شود که محور افقی نمایانگر زمان و محور عمودی سمت چپ نمایانگر مقادیر محرک و محور عمودی سمت راست نمایانگر مقادیر پاسخ است (شکل ۴). با محاسبه فاصله زمانی میان نقطه اوج نمودار سرعت نسبی و نقطه اوج مجاور در نمودار شتاب، مقدار زمان واکنش در هر بازه به دست می‌آید. با به دست آمدن مقدار زمان واکنش در هر بازه، سایر پارامترهای مورد نیاز برای پرداخت مدل نیز تعیین می‌شود. با وجود تفاوت در رفتار رانندگان در شرایط شتاب منفی نسبت به شتاب مثبت و اهمیت بررسی فرایند تعقیب خودرو در شرایط شتاب منفی به لحاظ ایمنی، تنها داده‌های مربوط به حالت شتاب منفی و سرعت نسبی منفی برای هر خودرو بررسی شد. با رعایت روند بالا در نهایت تعداد ۲۸۱ رکورد داده به دست آمد و پرداخت مدل نیز با همین داده‌ها انجام شد.

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 است و هر رکورد حاوی اطلاعات وضعیت حرکتی یک خودرو در یک لحظه مشخص است. از بین کل داده‌ها، نمونه‌ای مناسب برای انجام رگرسیون انتخاب شد. بدین ترتیب، دو شرط زیر برای انتخاب سری زمانی تعقیب خودرو مد نظر قرار گرفت: ۱- طول مدت زمان تعقیب بیش از ۵۵ ثانیه باشد و ۲- میانگین سرفاصله زمانی حین فرایند تعقیب کمتر از ۳ ثانیه باشد. این نحوه انتخاب سری زمانی تعقیب خودرو براساس [۱۲ و ۱۳] است. در نهایت، حدود ۴۸۰۰ رکورد داده مربوط به ۸ سری زمانی تعقیب خودرو (همه خودروی سواری) به دست آمد.

### ۳-۲- پرداخت مدل GHR

به علت غیرخطی بودن رابطه تعقیب خودرو GHR، ابتدا از طرفین مدل، (رابطه ۱)، لگاریتم گرفته شد. فرم خطی شده رابطه GHR به صورت رابطه ۵ است:

$$\log\left(\frac{a_n(t + \Delta t)}{v_{n-1}(t) - v_n(t)}\right) = \log(\alpha) + m \log(v_n(t + \Delta t)) - \log(x_{n-1}(t) - x_n(t)) \quad (5)$$



شکل (۴) تخمین واکنش لحظه‌ای با استفاده از نمودار سرعت نسبی و شتاب [۳]

## ۳-۳- مدل پیشنهادی تعقیب خودرو

در این پژوهش از شاخص TTC به عنوان محرک، به جای محرک سرعت نسبی در مدل GHR، استفاده شده است. بنابراین، مدل پیشنهادی تعقیب خودرو تنها برای حالت شتاب منفی به شکل رابطه ۶ ارائه می شود:

(۶)

$$a_n(t + \Delta t) = \left\{ \beta (v_n(t + \Delta t))^r \right\} \left[ \frac{1}{TTC} \right]^k$$

که  $\beta$ ،  $r$  و  $k$  ثابت های پرداخت مدل است.

فرم خطی شده رابطه ۶، برای آماده سازی مدل برای پرداخت به وسیله رگرسیون خطی، پس از لگاریتم گیری از طرفین آن، به شکل رابطه ۷ است:

$$\log(a_n(t + \Delta t)) = \log(\beta) + r \log(v_n(t + \Delta t)) - k \log(TTC) \quad (۷)$$

با استفاده از همان داده های مهیا شده برای پرداخت مدل GHR، مدل پیشنهادی رابطه ۷ با روش Gurusinghe [۱۴] (توضیح در قسمت ۳-۲) پرداخت می شود.

## ۴- نتایج پرداخت و مقایسه

این بخش به بررسی نتایج پرداخت مدل تعقیب خودرو GHR و مدل تعقیب خودرو پیشنهادی با استفاده از داده های موجود می پردازد. در نهایت براساس نتایج حاصل، مقایسه میان این دو مدل تعقیب خودرو انجام می شود.

## ۴-۱- نتایج پرداخت مدل GHR

هدف از پرداخت مدل GHR، به دست آوردن پارامترهای نامعلوم مدل، یعنی  $m$ ،  $l$  و  $\alpha$  است. نتایج پرداخت فرم خطی مدل GHR، (رابطه ۸)، با رگرسیون خطی و به وسیله نرم افزار SPSS مطابق جدول ۲ است. داده های این پرداخت شامل اطلاعات شتاب و سرعت نسبی منفی خودروهای تعقیب کننده و جلویی است.

با توجه به نتایج پرداخت مدل، (جدول ۲)، مقادیر  $m$ ،  $l$  و  $\alpha$  به ترتیب برابر ۰/۷۲۶، ۰/۶۱ و ۰/۷۷۸ محاسبه می شوند. بنابراین، فرم پرداخت شده مدل GHR، برای وضعیت محرک منفی (خودروی تعقیب کننده در حال نزدیک شدن به خودروی جلویی باشد)، به شکل رابطه ۸ است:

$$a_n(t + \Delta t) = \left\{ \frac{0.778 (v_n(t + \Delta t))^{-0.726}}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^{0.61}} \right\} [v_{n-1}(t) - v_n(t)] \quad (۸)$$

## ۴-۲- نتایج پرداخت مدل پیشنهادی تعقیب خودرو

هدف از پرداخت مدل پیشنهادی تعقیب خودرو، (رابطه ۶)، به دست آوردن پارامترهای مدل، یعنی  $k$ ،  $r$  و  $\beta$  است. نتایج پرداخت فرم خطی مدل پیشنهادی تعقیب خودرو، (رابطه ۷)، با رگرسیون خطی مطابق جدول ۳ است. داده های این پرداخت نیز شامل اطلاعات شتاب و سرعت نسبی منفی خودروهای تعقیب کننده و جلویی است.

جدول (۲) نتایج پرداخت فرم خطی مدل GHR، با استفاده از داده های شتاب و سرعت نسبی منفی

| تعداد مشاهدات | F-stat | ضریب تعیین ( $R^2$ ) | $\log(\alpha)$ | -l    | m     |               |
|---------------|--------|----------------------|----------------|-------|-------|---------------|
| ۲۸۱           | ۴۲/۱۲۵ | ۰/۲۳۳                | -۰/۱۰۹         | -۰/۶۱ | ۰/۷۲۶ | مقدار پارامتر |
|               |        |                      | ۰/۵۴۸          | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | سطح معنی داری |
|               |        |                      | -۰/۶۰۱         | -۶/۹۷ | ۷/۲۱۵ | t-stat        |

جدول (۳) نتایج رگرسیون مدل پیشنهادی تعقیب خودرو، با استفاده از داده‌های شتاب و سرعت نسبی منفی

| تعداد داده‌ها | F-stat | ضریب تعیین (R <sup>2</sup> ) | log( $\beta$ ) | -k      | r     |               |
|---------------|--------|------------------------------|----------------|---------|-------|---------------|
| ۲۸۱           | ۲۳۷/۹  | ۰/۶۳۱                        | ۰/۶۷۰          | -۰/۷۴۴  | ۰/۳۸۱ | مقدار پارامتر |
|               |        |                              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰   | ۰/۰۰۱ | سطح معنی داری |
|               |        |                              | ۴/۸۸۶          | -۱۹/۷۳۰ | ۳/۳۴۱ | t-stat        |

کارایی این مدل با ضریب تعیین ۰/۲۳۳ قابل قبول نیست و نشان می‌دهد که این مدل نمی‌تواند فرایند تعقیب را، در حالت نزدیک شدن دو خودرو به هم به خوبی توصیف کند. در مقابل، مدل پرداخت شده تعقیب خودروی پیشنهادی، (جدول ۳)، نشان می‌دهد که همه پارامترهای  $\beta$  و  $r$  و  $k$  نسبتاً معنی دار هستند. کارایی این مدل با ضریب تعیین ۰/۶۳۱ قابل قبول است و نشان می‌دهد که این مدل نسبت به مدل GHR قابلیت واقعیت‌بینی بیش‌تری دارد و بهتر واقعیت را توصیف می‌کند. هم‌چنین در تحلیل روندگرایی برآورد-مشاهده شتاب مدل تعقیب خودروی پیشنهادی، کارایی این مدل (ضریب تعیین ۰/۸۸۳) تأیید می‌شود.

لازم به‌ذکر است محرک در مدل GHR، که مبنای تصمیم‌گیری خودروی تعقیب‌کننده است، در حالت نزدیک شدن خودروی تعقیب‌کننده به خودروی جلوئی، تنها اختلاف سرعت بین خودروهاست؛ در حالی‌که راننده در عمل، علاوه بر اختلاف سرعت به اختلاف فاصله هم توجه ویژه‌ای دارد؛ به همین دلیل است که مدل تعقیب خودروی پیشنهادی، با در نظر گرفتن آثار توأم اختلاف سرعت و اختلاف فاصله به‌عنوان محرک (پارامتر زمان تا تصادف)، کارایی بهتری نسبت به مدل GHR دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بررسی مدل‌های تعقیب خودرو روانی - جسمانی و برخی مطالعات مرتبط نشان می‌دهد که تغییر شتاب در فرایند تعقیب خودرو تنها تابع اختلاف سرعت دو خودرو و یا فاصله آن‌ها از یکدیگر نیست. بلکه رانندگان در شرایط

با توجه به نتایج پرداخت مدل، (جدول ۳)، مقادیر  $k$ ،  $r$  و  $\beta$  به ترتیب برابر ۰/۷۴۴، ۰/۳۸۱ و ۴/۶۷۸ محاسبه می‌شوند. بنابراین، فرم پرداخت شده مدل تعقیب خودروی پیشنهادی، برای وضعیت محرک منفی (خودرویی تعقیب‌کننده در حال نزدیک شدن به خودروی جلوئی باشد)، به‌شکل (رابطه ۹) است:

$$a_n(t + \Delta t) = \left\{ \frac{1}{TTC} \right\}^{1/0.744} \left\{ \frac{1}{4.678} (v_n(t + \Delta t))^{-0.381} \right\} \quad (9)$$

جدول ۴ نتایج تحلیل روندگرایی برآورد-مشاهده شتاب مدل تعقیب خودروی پیشنهادی را نشان می‌دهد. کارایی مدل تعقیب خودروی پیشنهادی در تحلیل روندگرایی برآورد-مشاهده، قابل قبول (ضریب تعیین ۰/۸۸۳) ارزیابی می‌شود.

جدول (۴) تحلیل روندگرایی برآورد-مشاهده شتاب مدل تعقیب

خودرویی پیشنهادی

| تعداد داده‌ها | F-stat  | ضریب تعیین (R <sup>2</sup> ) | $\beta'$ | $\alpha'$ | $a_{pred} = \alpha'$<br>$a_{obs} + \beta'$ |
|---------------|---------|------------------------------|----------|-----------|--|
| ۲۸۱           | ۳۴۲/۱۱۴ | ۰/۸۸۳                        | -۰/۳۷۹   | ۰/۷۵۵     | مقدار پارامتر                              |
|               |         |                              | ۰/۰۰۰    | ۰/۰۰۰     | سطح معنی داری                              |
|               |         |                              | -۸/۸۲۰   | ۴۵/۹۸۲    | t-stat                                     |

## ۳-۴- بحث و مقایسه

نتایج مدل پرداخت شده GHR، جدول ۲، نشان می‌دهد که پارامترهای  $m$  و  $l$  معنی‌دارند ولی پارامتر  $\alpha$  معنی‌دار نیست (چون  $\log(\alpha)$  دارای سطح معنی‌داری ۰/۵۴۸ است).



## ۷- مراجع

- [1] M. Brackstone and M. McDonald, "Car-following: a Historical Review," *Transportation Research F*, vol. 2, pp. 181-196, 1999.
- [2] P. Chakroborty and S. Kikuchi, "Evaluation of the General Motors based car-following models and a proposed fuzzy inference model," *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, vol. 7, pp. 209-235, Aug 1999.
- [3] P. Ranjitkar, T. Nakatsuji, and A. Kawamura, "Experimental analysis of car-following dynamics and traffic stability," *Transportation Research Record*, pp. 22-32, 2005.
- [4] 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.
- [5] J. Wang, R. H. Liu, and F. Montgomery, "Car-following model for motorway traffic," *Transportation Research Record*, pp. 33-42, 2005.
- [6] S. Ossen and S. P. Hoogendoorn, "Car-following behavior analysis from microscopic trajectory data," in *Transportation Research Record*, 2005, pp. 13-21.
- [7] M. Aycin and R. Benekohal, "Performance of the generalized car-following model obtained from macroscopic flow relationships in simulating field data," in *TRB Annual Meeting Washington, DC*, 2004.
- [8] J. C. Hayward, "Near miss determination through use of a scale of danger," in *Highway Research Board (traffic records 384) Washington, DC.*, 1972.
- [9] L. A. Pipes and C. K. Wojcik, "A contribution to theory of traffic flow," in *SAE Conference Proceedings Analysis and Control of Traffic Flow Symposium*, 1968, pp. 53-60.
- [10] W. Winsum, "The human element in car following models," *Transportation Research Part F*, vol. 2, pp. 207-211, 1999.
- [11] NGSIM, <http://ngsim.fhwa.dot.gov>: Next generation simulation, June 5, 2009.

سرعت نسبی منفی (سرعت خودروی عقبی بیش تر از جلویی) با توجه به پارامتر TTC با خودروی جلویی، از خود واکنش نشان می دهند. با استفاده از سرعت نسبی، به عنوان محرک در مدل تعقیب خودرو GHR، تطابق نسبتاً پایینی میان رفتار پیش بینی شده به وسیله ی مدل و رفتار واقعی جریان ترافیک مشاهده می شود؛ چرا که پرداخت مدل با استفاده از داده های خرد جریان واقعی ترافیک پروژه NGSIM در [آزادراه I-80] نشان می دهد ضریب تعیین مدل حدود ۰/۲۳ است. در این پژوهش برای بهبود مدل GHR از شاخص TTC به عنوان محرک در مدل استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از پرداخت مدل پیشنهادی و مدل GHR نشان می دهد که با تغییر عامل محرک، مدل توانایی بیش تری در پیش بینی رفتار واقعی جریان ترافیک در فرایند تعقیب خودرو دارد. شاخص TTC در شرایط سرعت نسبی مثبت قابل تعریف نیست و مدل پیشنهادی تنها در شرایط اعمال شتاب منفی قادر به پیش بینی رفتار رانندگان خواهد بود. از آن جا که در شرایط شتاب مثبت ایمنی چندان مطرح نخواهد بود، رانندگان در انتخاب شتاب به سایر عوامل توجه بیش تری دارند. نقش مدل های تعقیب خودرو به ویژه در توسعه مدل های شبیه سازی جریان ترافیک و سیستم های کنترل خودکار خودرو و تغییرات رفتار رانندگان در کشورهای مختلف، متفاوت است؛ از این رو برای افزایش کارایی مدل های تعقیب خودرو، واجب است هر مدل ابتدا با توجه به شرایط محلی پرداخت شود. تهیه داده های خرد جریان ترافیک برخی آزادراه های کشور می تواند گام مهمی برای شناخت رفتار حرکتی رانندگان، پرداخت و توسعه مدل های تعقیب خودرو، کاهش تصادفات جلو به عقب و در نهایت افزایش ایمنی راه های کشور شود.

- [14] G. Gurusinghe and T. Nakatsuji, "Estimation of car following model parameters," Asian Institute of Technology, School of Civil Engineering 1998.
- [12] M. Brackstone, B. Waterson, and M. McDonald, "Determinants of following headway in congested traffic," Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour, vol. 12, pp. 131-142, Mar 2009.
- [13] 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.

# Applying Time-to-Collision to Enhance the Coefficient of Determination for GHR Car-Following Model in Deceleration Mode

S.S. Naseralavi<sup>1\*</sup>, M. Saffarzadeh<sup>2</sup>, N. Nadimi<sup>3</sup>, A.R. Mamdoohi<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Research Associate, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

saber\_alavi@modares.ac.ir

## Abstract:

Car-Following models are integral parts of capacity analysis, safety research, traffic simulation, and developing advanced vehicle control systems. During the past six decades, various car following models have been developed. GHR is the most well-known stimulus based model, in which the stimulus is the relative velocity of vehicles. In this research, time-to-collision (TTC), as the stimulus, is proposed as a substitute for relative velocity in the GHR model. GHR model is calibrated based on the comprehensive and detailed data gathered in the NGSIM project on I-80 freeway. The Results of GHR model calibration based on the data obtained for the two stimuli indicated that coefficient of determination ( $R_2$ ) increased from 0.233 in the base model to 0.638 in the proposed model. In all, the results indicated that the application of TTC as the stimulus in the GHR model would improve the model's outcome.

**Keywords:** Time-to-collision indicator, Car-following model, NGSIM project, GHR model, Model calibration