

ارزیابی میزان انحراف رفتار راننده پیرو نسبت به راننده ایده آل در آشفتگی جریان ترافیک با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

ارسلان صالحی کلام^۱، علی عبدی کردانی^۲، امیرعباس رصافی^{۳*}

- ۱- دانشجوی دکترای راه و ترابری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره)
- ۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره)
- ۳- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره)

rasafi@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۶/۱۲/۰۵

تاریخ دریافت ۹۵/۱۱/۰۲

چکیده

ترافیک توقف-حرکت در آزادراه‌ها، منجر به آشفتگی جریان ترافیک و افزایش تأخیر می‌شود. وسایل نقلیه پیرو در زنجیره داده‌های عبوری در زمان ورود و خروج از آشفتگی به سبب ذات غیرقابل پیش‌بینی رفتار رانندگی، الگوهای رفتاری متفاوتی نسبت به اثر موج توقف-حرکت نشان می‌دهند. الگوهای رفتاری راننده پیرو در زنجیره وسایل نقلیه با استفاده از تئوری نامتقارن رفتاری در فاز کاهش شتاب به دو الگوی رفتاری زیرواکنشی و روواکنشی منتهی می‌شود. راننده پیرو بر اساس الگوهای رفتاری در فاز کاهش شتاب، پاسخ‌های متفاوتی نسبت به موج کاهش شتاب دریافتی نشان می‌دهد که منجر به افت سرعت کم‌تر یا بیشتری نسبت به راننده ایده‌آل، و تأخیر بیشتر یا کم‌تر در زنجیره حرکت وسایل نقلیه می‌شود. در این مقاله، دو پارامتر انحراف رفتار و زمان تغییر رفتار راننده پیرو نسبت به راننده ایده‌آل، بر اساس مدل تعقیب خودرو نوول، در فاز کاهش شتاب نسبت به موج کاهش شتاب انتشاریافته در زنجیره وسایل نقلیه شناسایی می‌شود. به منظور شناسایی کم‌ترین زمان تأخیر در زنجیره وسایل نقلیه در فاز کاهش شتاب، روش تحلیل پوششی داده‌ها به کار گرفته شد تا کاراترین میزان انحراف رفتار و زمان تغییر رفتار راننده پیرو متناسب با موج کاهش شتاب دریافتی و سرفاصله مکانی پیرو در زمان دریافت موج تعیین شود. نتایج نشان دادند که بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی در سرعت‌ها و سرفاصله‌های مکانی مختلف، راننده پیرو به رانندگی با الگوی رفتاری خود تمایل دارد، درحالی‌که مقدار موج انتشاریافته از وسیله پیشرو تأثیری بر خروجی‌ها ندارد. نتایج ذکرشده منجر به تأخیر کم‌تر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود.

واژگان کلیدی: ترافیک توقف-حرکت، انحراف رفتار، الگوهای رفتاری، تحلیل پوششی داده‌ها

۱- مقدمه

مورد توجه پژوهشگران بسیار زیادی قرار گرفته است [1, 2]، اما تاکنون به دلیل فقدان داده‌های عبوری و نوسانی بودن داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حس‌گرها، درک سازوکار شکل‌گیری و انتشار جریان ترافیک با زنجیره‌ای از شروع به حرکت‌ها و

ترافیک توقف-حرکت^۱ یا آشفتگی ترافیک به سبب آثار منفی مانند: افزایش مصرف سوخت، آثار زیست‌محیطی، کاهش ایمنی

1 Stop and go traffic

توقف‌های متوالی محدود بوده است. آشفتگی جریان ترافیک از دو مؤلفه، شکل‌گیری و انتشار تشکیل می‌شود. مانورهای تغییر خط [3, 4, 5, 6, 7, 8] یا هر نوعی از گلوگاه‌های ترافیک [9, 10] منجر به شکل‌گیری ترافیک توقف-حرکت می‌شود. ترافیک توقف-حرکت برای نخستین بار توسط ادی³ در تونل لینکلن شناسایی شد، اما دلایل و سازوکار شکل‌گیری و انتشار ترافیک توقف-حرکت هنوز مبهم است [11]. پژوهش‌های ادی نشان می‌دهد که ترافیک توقف-حرکت حتی بدون مانورهای تغییر خط، به سبب افت ناگهانی سرعت در زنجیره وسایل نقلیه تشکیل می‌شود و موج به سمت جریان بالادست منتشر می‌شود، اما دلایل رشد دامنه آشفتگی و دوره‌های منظم ۲ تا ۱۵ دقیقه‌ای آشفتگی تاکنون مبهم است [5, 12, 13, 14].

پژوهش‌ها روی تحلیل پایداری وسیله نقلیه پیرو نشان می‌دهند که آشفتگی‌های کوچک می‌توانند رشد کنند و زمانی که پارامترهای مدل به‌دقت انتخاب شوند آشفتگی‌ها تکمیل می‌شوند [15, 16]. تریبر و کستینگ به طور تحلیلی ویژگی‌های آشفتگی ترافیکی (طول موج و نرخ رشد) را محاسبه کردند. پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که ناپایداری منجر به آشفتگی جریان ترافیک می‌شود و نیز پارامترهای مدل را مؤثر در میزان ناپایداری معرفی کردند [17].

ژنگ با استفاده از روش انتقال موج، مسیر داده‌های عبوری را تحلیل و ویژگی‌های آشفتگی جریان ترافیک، دامنه و مدت آشفتگی، را مطالعه کرد. وی با مقایسه قبل و بعد از آشفتگی، رفتار راننده را در مدت آشفتگی جریان ترافیک تحلیل کرد اما نتوانست پویایی رفتار راننده وسیله نقلیه پیرو را در آشفتگی جریان ترافیک ارائه کند [6, 7].

مقایسه رفتار توقف-حرکت زنجیره وسایل نقلیه عبوری در آزادراه‌ها در زمان خروج از آشفتگی ترافیک با رفتار آنان در حال نزدیک شدن به آشفتگی ترافیک، که بیانگر تأخیر در بازیابی سرعت در زمان خروج از آشفتگی ترافیک است، سبب تشکیل پدیده هیسترسیس در جریان ترافیک می‌شود. تریبر و مریر برای نخستین بار با کمک عکس‌برداری هوایی رفتار

زنجیروار وسایل نقلیه را در ورود و خروج از آشفتگی ترافیکی مطالعه و پی بردند که مقایسه نمودارهای چگالی و سرعت و نرخ جریان در زنجیره وسایل نقلیه در آشفتگی منجر به تشکیل حلقه می‌شود [18]. نوول³ بر اساس تئوری نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب، تأخیر در فاز شتاب‌گیری وسایل نقلیه (پیرو و پیشرو) را معرف پدیده هیسترسیس ارائه کرد [19]. ژنگ تئوری نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب را فرموله و جریان ترافیک را به سه فاز آسایش⁴ در فاز افزایش سرعت، ناحیه پیش‌بینی⁵ در فاز کاهش سرعت، ناحیه تعادلی بین پیش‌بینی و آسایش⁶ بین دو حالت قبل تقسیم‌بندی کرد که انتقال بین سرعت-چگالی در فازهای مختلف منجر به شناسایی حلقه‌های هیسترسیس شد [20].

ژانگ به منظور مدل‌سازی وسیله نقلیه پیرو، تئوری جدیدی معرفی کرد. بر اساس تئوری وی، فاصله زمانی⁷ به‌صورت تابعی از فاصله مکانی⁸ ارائه شد [21]. مدل‌سازی عددی این تئوری اثبات کرد که این مدل، هیسترسیس ترافیکی را همراه با افت ظرفیت در مدت تبدیل جریان آزاد به جریان ازدحام به وجود می‌آورد.

یئو و اسکاوریان یک تئوری نامتقارن جزئی‌نگر بر اساس رابطه سرعت و سرفاصله مکانی در فاز کاهش و افزایش شتاب ارائه کردند. بر اساس این تئوری، پنج فاز ترافیکی شامل جریان آزاد، افزایش شتاب، کاهش شتاب، کرانه‌ای و پایا⁹ در جریان ترافیک شناسایی شد. نامتقارنی و گسستگی بین منحنی‌های افزایش و کاهش شتاب بین فاز افزایش و کاهش شتاب منجر به تشکیل حلقه‌های هیسترسیس در نمودار سرعت-سرفاصله مکانی شد [22]. لاوال و آهان با استفاده از روابط ادی در آشفتگی جریان ترافیک، دامنه پدیده هیسترسیس ترافیکی را در نمودار سرعت-سرفاصله مکانی اندازه‌گیری کردند. تحقیقات آن‌ها بر اساس تحلیل داده‌های عبوری بر اساس تئوری موج کینماتیکی و مدل وسیله نقلیه تعقیب خودرو نیویل نشان می‌دهد که متفاوت بودن

3 Newell

4 Relaxation dominate

5 Anticipation dominate

6 Anticipation-Relaxation balanced

7 Gap-time

8 Gap-distance

9 Stationary

میزان و زمان تغییر رفتار نسبت به مقادیر مختلف امواج و سرفاصله مکانی در الگوهای رفتاری مختلف تحلیل می‌شود و علل تأخیر در زنجیره وسایل نقلیه بر اساس الگوهای رفتاری راننده در سطح جزئی‌نگر بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

زمانی که وسیله نقلیه پیرو با سرفاصله زمانی کم‌تر از ۳ ثانیه در حال حرکت است تحت تأثیر رفتار رانندگی وسیله نقلیه پیشرو و حرکت تعقیب خودرو است. در این پژوهش، الگوهای رفتاری راننده پیرو در زنجیره وسایل نقلیه نسبت به موج توقف-حرکت شناسایی می‌شوند. راننده پیرو نسبت به موج کاهش شتاب دریافتی بر اساس ویژگی‌های خود تغییر رفتار می‌دهد. با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها میزان و زمان تغییر رفتار راننده پیرو در امواج کاهش شتاب و سرفاصله مکانی متفاوت تعیین می‌شود.

۲-۱ مدل رفتاری نوول

در تئوری مدل نوول زمانی که وسیله نقلیه پیشرو سرعتش را از V به V' تغییر می‌دهد موج آشفتگی با سرعت $\frac{\delta^i}{\tau^i}$ از وسیله پیشرو به وسیله پیرو انتقال می‌یابد که منجر به افزایش شتاب وسیله پیرو می‌شود. سرعت وسایل نقلیه پیرو در شرایط ازدحام در نمودار فاصله-زمان با پارامترهای زمان سفر موج بین دو وسیله نقلیه متوالی در ازدحام، τ ، سرفاصله مکانی اشباع، δ ، تغییر فاز حرکت می‌دهند. در این مدل مقادیر τ^i و δ^i مقادیری ثابت و برای هر وسیله مستقل از سرعت فرض شده که منجر به رابطه خطی بین سرعت و سرفاصله مکانی $s^i = \delta^i + \tau^i v$ می‌شود [14].

۲-۲ رفتار سنجی راننده بر اساس تئوری نامتقارنی

تحلیل جزئی‌نگر رفتار راننده در مسیرهای عبوری وسایل نقلیه، بیانگر پیچیدگی رفتاری مانند پاسخ‌های مختلف راننده وسیله نقلیه پیرو در رفتار رانندگی است. خطاهای عملکردی و پیش‌بینی^۱ دو الگوی مشاهده شده متداول رفتار راننده در تحلیل داده‌های عبوری هستند. با توجه به این که خطای

رفتار راننده (راننده پرخاشگر و محتاط) منجر به تشکیل شدن دامنه حلقه‌های متفاوت پدیده هیستریسیس در آشفتگی جریان ترافیک در سطح جزئی‌نگر می‌شود [23, 24].

به منظور شناسایی میزان انحراف و زمان تغییر رفتار راننده پیرو بر اساس پارامترهای مختلف نیازمند استفاده از روش‌هایی هستیم تا بتوانیم بهترین وضعیت هر متغیر را بر اساس الگوهای رفتاری مختلف تعیین کنیم. روش تحلیلی پوششی داده‌ها به عنوان یک روش مناسب به منظور یافتن بهترین گزینه در شرایط واقعی و موجود است.

رصافی و همکاران دو روش تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل همایی نقاط را به منظور شناسایی و رتبه‌بندی نقاط پرحادثه به عنوان یک روش جایگزین معرفی کردند. این دو روش که از زیرشاخه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره هستند توانایی استفاده از عوامل و پارامترهای مختلف مؤثر را دارند. آن‌ها پی بردند که استفاده از این دو روش به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر تصادفات به همراه شدت آن‌ها دارای دقت شناسایی و اولویت‌بندی بالاتری هستند [27].

بهنود و همکاران با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها، بر اساس مفهوم ناکارایی، نسبت نرخ تلفات جاده‌ای به مجموع وزن‌دار نرخ اقدامات ایمن‌سازی، به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی اقدامات ایمن‌سازی راه در استان‌های کشور ایران استفاده کردند. آن‌ها پی بردند که بر اساس یک سیستم خبره با استفاده از استدلال فازی تشکیل شده می‌تواند به عنوان سیستم پشتیبانی از تصمیم فازی در مدیریت و برنامه‌ریزی اقدامات ایمن‌سازی راه مورد استفاده قرار گیرد [28].

سعید حسامی و همکاران از تحلیل پوششی داده‌ها به علت قابلیت انعطاف و توسعه و سازگاری استفاده کردن تا ابعاد، اهداف و جوانب مسئله ارزیابی عملکرد ماهیت چندبعدی حمل‌ونقل عمومی را بررسی کنند [29].

وسيله نقلیه پیرو نسبت به موج منتشرشده از وسیله نقلیه پیشرو رفتارهای متفاوتی نشان می‌دهد. در این پژوهش، بر اساس داده‌های عبوری NGSIM، به منظور توصیف رفتار رانندگی تحت شرایط ازدحام ترافیکی الگوهای رفتاری راننده پیرو نسبت به امواج توقف-حرکت منتشرشده در زنجیره وسایل نقلیه شناسایی می‌شوند. با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

عملکردی منجر به ایجاد الگوی رفتاری می‌شود در ادامه در مورد آن توضیح داده شده است.

رانندگان در تنظیم کردن سرعت خود به سبب خطاهای درک^{۱۱}، تخمین^{۱۲} و عملکردی در ترافیک عبوری دقیق عمل نمی‌کنند. تخمین به معنی روش‌های ارزیابی و بررسی کردن پاسخ عملیات درک شده از وسایل دیگر است به عبارت دیگر، زمانی که وسیله شروع به ترمز گرفتن می‌کند وسیله پیرو اقدام به تخمین کاهش شتاب خود می‌کند و خطاهای عملکردی ناشی از خطاهای پاسخ رانندگان، به سبب کنترل کردن مؤلفه‌های مکانیکی وسیله است. چشم‌پوشی از مؤلفه‌های مکانیکی، خطاهای عملکردی به دو گروه زیرواکنشی^{۱۳} و روواکنشی^{۱۴} نسبت به رفتار متعادل تقسیم‌بندی می‌شود که به مقدار تغییر سرعت وسیله پیرو در فاز افزایش و کاهش شتاب بستگی دارند. اگر وسیله نقلیه پیرو در فاز کاهش شتاب افت سرعت کم‌تری نسبت به مقدار موردنیاز انجام بدهد، الگوی رفتاری زیرواکنشی شکل (۱-۱) و اگر افت سرعت بیشتری نسبت به مقدار موردنیاز بدهد الگوی رفتاری روواکنشی شکل (۱-۲) را انجام داده است. در هر دو مورد زیرواکنش و روواکنش، مقدار تغییر سرعت منجر به انتشار دومین موج به جریان بالادست شده، و مقدار کمینه سرعت وسیله پیرو کم‌تر از مقدار سرعت کمینه سرعت وسیله پیشرو می‌شود. دو الگوی زیرواکنشی ثابت و روواکنشی ثابت رفتاری مشابه دو حالت زیرواکنشی و روواکنشی دارند فقط با این تفاوت که راننده وسیله نقلیه پیرو از زمان دریافت موج منتهی به ازدحام تا خروج از توقف، تغییر رفتار ثابت افزایشی یا کاهشی دارد و به سمت راننده ایده‌آل، نوول، متمایل نمی‌شود [22].

۳-۲ پارامتر انحراف رفتار راننده پیرو نسبت به راننده ایده‌آل

در زمان دریافت آخرین موج کاهش شتاب منتهی به ازدحام بر اساس الگوهای رفتاری مختلف، وسیله نقلیه پیرو نسبت به رفتار متعادل (راننده نوول)، انحراف رفتار می‌دهد و سپس در

نقطه واکنش^{۱۵} دوباره به سمت رفتار راننده ایده‌آل متمایل می‌شود شکل (۲). به منظور شناسایی نقاط و میزان انحراف رفتار راننده پیرو نسبت به راننده ایده‌آل، نقاط و میزان انحراف رفتار راننده پیرو نسبت به راننده ایده‌آل بر اساس مقدار موج دریافتی در آشفتگی جریان ترافیک محاسبه می‌شود. در این تحلیل آخرین موج کاهش شتاب که منتهی به ازدحام می‌شود بر اساس تئوری نامتقارن رفتاری و مدل تعقیب خودرو نوول شناسایی می‌شود و مطابق فرمول (۱) با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مقدار موج، پارامتر مکانی δ^i و پارامتر زمان τ^i مسیر رفتار راننده ایده‌آل در نمودار فاصله - زمان مشخص می‌شود. اختلاف مسیر واقعی و مسیر نوول در وسیله نقلیه پیرو در نقطه واکنش، معیار انحراف تغییر رفتار راننده پیرو است و مطابق فرمول (۲) محاسبه می‌شود که ویژگی‌های میزان انحراف رفتار و نقطه بازگشت راننده پیرو به راننده متعادل، نوول، بر اساس گروه‌بندی راننده در آشفتگی ترافیک را می‌دهد.

$$X_{N,Follower} = X_{Leader} - \delta \quad (۱)$$

$$\varepsilon = X_{N,Follower} - X_{Real,Follower} \quad (۲)$$

$X_{N,Follower}$: فاصله مکانی وسیله نقلیه پیرو،

X_{Leader} : فاصله مکانی وسیله نقلیه پیشرو،

δ : پارامتر مکانی انتشار موج کاهش شتاب،

$X_{N,Follower}$: فاصله مکانی وسیله نقلیه نوول (ایده‌آل)

ε : میزان انحراف رفتار راننده پیرو دارای دو مقدار بیشتر و کم‌تر از رفتار راننده نوول است:

۱. برای راننده زیرواکنشی در فاز کاهش شتاب مقدار انحراف رفتار کوچک‌تر از صفر است که بیانگر افت سرعت کم‌تر نسبت به رفتار راننده نوول است.

۲. برای راننده روواکنشی در فاز کاهش شتاب مقدار انحراف رفتار بزرگ‌تر از صفر است که بیانگر افت سرعت بیشتر نسبت به رفتار راننده نوول است.

۴-۲ روش تحلیل پوششی داده‌ها

روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری مختلف در وضعیت چند ورودی و چند خروجی است شکل (۳). برای ارزیابی نسبی واحدها، نیازمند تعیین دو مشخصه ماهیت الگو و ساختار بازده به مقیاس است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

شکل ۳. واحد تصمیم‌گیری با N ورودی و N خروجی

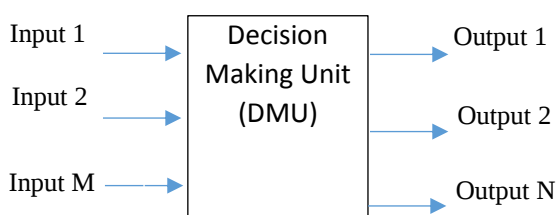


Fig. 3. Decision making unit with M input and N output

یکی از ویژگی‌های مدل تحلیلی پوشش داده‌ها ساختار بازده به مقیاس است که می‌تواند ثابت یا متغیر باشد.

الف) بازده به مقیاس ثابت: افزایش ورودی به افزایش خروجی به همان نسبت منجر می‌شود.

ب) بازده به مقیاس متغیر: افزایش خروجی، بیشتر یا کمتر از نسبت افزایش ورودی است.

در این پژوهش از ویژگی بازده به مقیاس متغیر استفاده است. ضمناً با توجه به جهت‌گیری حل، دو روش ورودی و خروجی محور مطرح شده است.

الف) ورودی محور: کمینه کردن ورودی‌ها با فرض ثابت بودن خروجی‌ها. در یک مدل ورودی محور، با ثابت نگه‌داشتن سطح خروجی‌ها سعی در کاهش ورودی‌ها است.

ب) خروجی محور: بیشینه کردن خروجی‌ها با فرض ثابت بودن ورودی‌ها، در یک مدل خروجی محور، با ثابت نگه‌داشتن سطح ورودی‌ها سعی در افزایش خروجی‌ها است.

چارلز و همکاران مدل CCR را به منظور ارزیابی و مقایسه نسبی واحدهای تصمیم‌گیری معرفی کردند، که توانایی اندازه‌گیری کارایی داده‌ها را با چندین ورودی و چندین خروجی دارد. مدل CCR یک مدل بازده ثابت نسبت به مقیاس

شکل ۱. زیرواکنش و ررواکنش در فاز کاهش شتاب

شکل ۱-۱. زیرواکنش

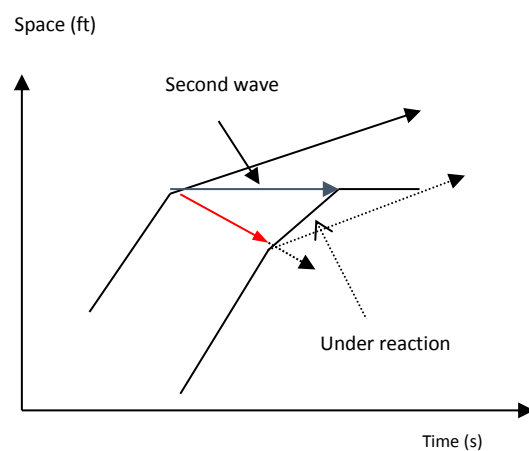


Fig. 1. 1. Under reaction

شکل ۱-۲. ررواکنش

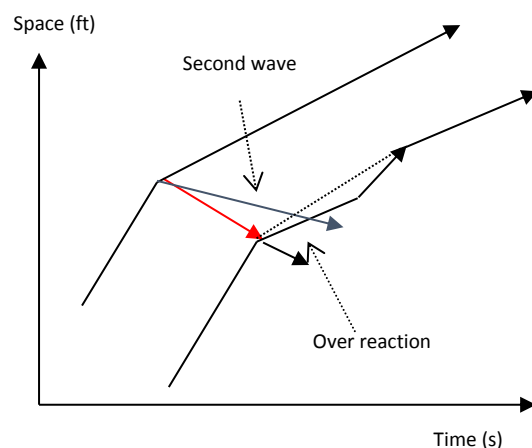


Fig. 1. 2. Over reaction

Fig. 1. Under reaction and over reaction in deceleration phase [22]

شکل ۲. انحراف رفتار راننده پیرو نسبت به راننده متعادل

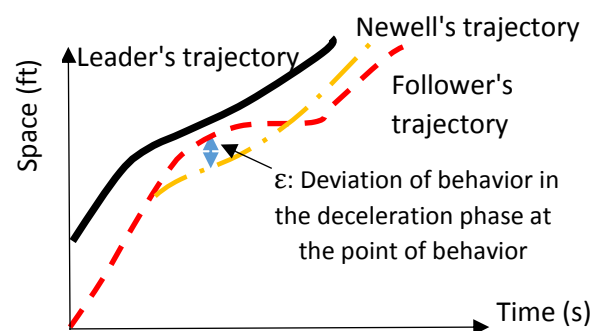


Fig. 2. Follower's behavior deviation with respect to the equilibrium driver

نقلیه، سرفاصله زمانی، سرفاصله مکانی و شتاب وسیله نقلیه، شماره وسیله نقلیه پیرو و پیشرو است که با دقت ۰/۱ ثانیه جمع‌آوری شده‌اند و مطابق جدول (۱)، نتایج آماری ارائه‌شده از الگوهای رفتاری راننده وسیله نقلیه پیرو ارائه می‌شود.

جدول ۱. نتایج آماری الگوهای رفتاری

Platoon number of patterns in deceleration phase	Classifying behavioral pattern
295	Over reaction
129	Under reaction
90	Over constant reaction
30	Under constant reaction

Table 1. Statistical results of behavioral patterns

در این پژوهش دو متغیر سرفاصله مکانی وسیله نقلیه پیرو در زمان دریافت موج و مقدار موج کاهش شتاب به‌عنوان ورودی و متغیر انحراف رفتار و زمان تغییر رفتار به‌عنوان خروجی واحدهای تصمیم‌گیری و شماره وسیله نقلیه پیرو در زمان دریافت موج به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیری متفاوت انتخاب می‌شوند (شکل ۴).

شکل ۴. ورودی و خروجی‌ها در واحد تصمیم‌گیری

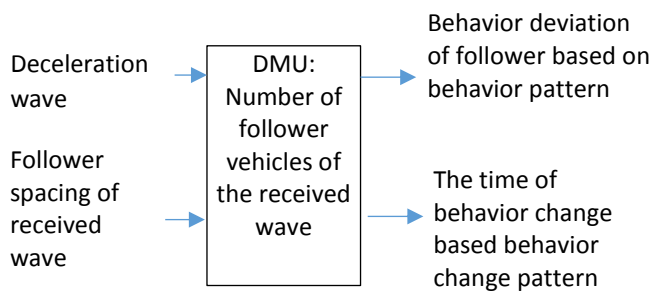


Fig. 4. Inputs and outputs of decision unit

۳-۱ داده‌های ورودی و خروجی بر اساس الگوی رفتاری روواکنشی

داده‌های ورودی و خروجی برای هر واحد تصمیم‌گیری بر اساس داده‌های NGSIM، بعد از تفکیک سازی الگوی رفتاری روواکنشی در شکل (۵)، ارائه شده است.

است که به برای ورودی‌ها و خروجی‌ها وزن‌های مختلفی اختصاص داده می‌شود تا بیشینه کارایی تابع هدف مطابق روابط زیر محاسبه شود. در این پژوهش، وسایل نقلیه پیرو با شماره‌های مختلف در ترافیک توقف-حرکت به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است که منجر به واحدهای تصمیم‌گیری متفاوت در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، واحدهای کارآ برای داده‌های عبوری تحلیل می‌شود که بر اساس هر الگوی رفتاری بیانگر میزان تاخیر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. به عبارت دیگر، واحدهای کارآ بر اساس هر الگوی رفتاری منجر به شناسایی پارامترهای مختلف ورودی موثر بر ازدیاد و یا کاهش زمان تاخیر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. مدل خطی شده بالا برای واحد تصمیم‌گیری ۰ به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}
 &MAX \quad \sum_{r=1}^s u_r y_{ro} \\
 &S.t. \quad \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 &\quad \sum_{i=1}^m v_i x_{io} = 1 \\
 &\quad u_r, v_i \geq 0.
 \end{aligned}$$

که در آن:

u_r : وزن تخصیص داده‌شده به خروجی r ام

v_i : وزن تخصیص داده‌شده به ورودی i ام

x_{ij} : میزان ورودی i ام برای واحد j ام

y_{rj} : میزان خروجی r ام برای واحد j ام

۳- داده‌های استفاده‌شده

در این پژوهش به منظور تحلیل رفتار راننده در آشفته‌گی جریان ترافیک از داده‌های عبوری آزادراه‌های US 101 و I-80 استفاده می‌شود که توسط پروژه NGSIM در مدت زمان (۴:۰۰ تا ۴:۱۵ بعدازظهر و ۵:۰۰ تا ۵:۱۵ بعدازظهر) در سال ۲۰۰۵ به‌وسیله دوربین فیلم‌برداری جمع‌آوری و سپس با استفاده از نرم‌افزار Trajectory Explorer تحلیل شده است [25, 26]. داده‌های عبوری پروژه NGSIM در سطح جزئی‌نگر شامل سرعت وسیله

شکل ۵. داده‌های ورودی و خروجی برای الگوی روواکنش

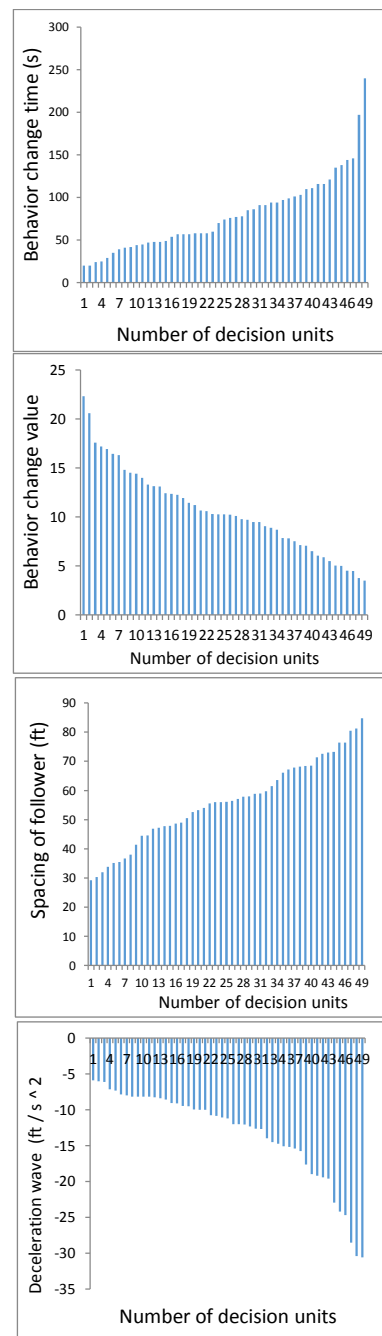


Fig. 5. Input and output data of overreaction pattern

شکل ۶. داده‌های ورودی و خروجی بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی

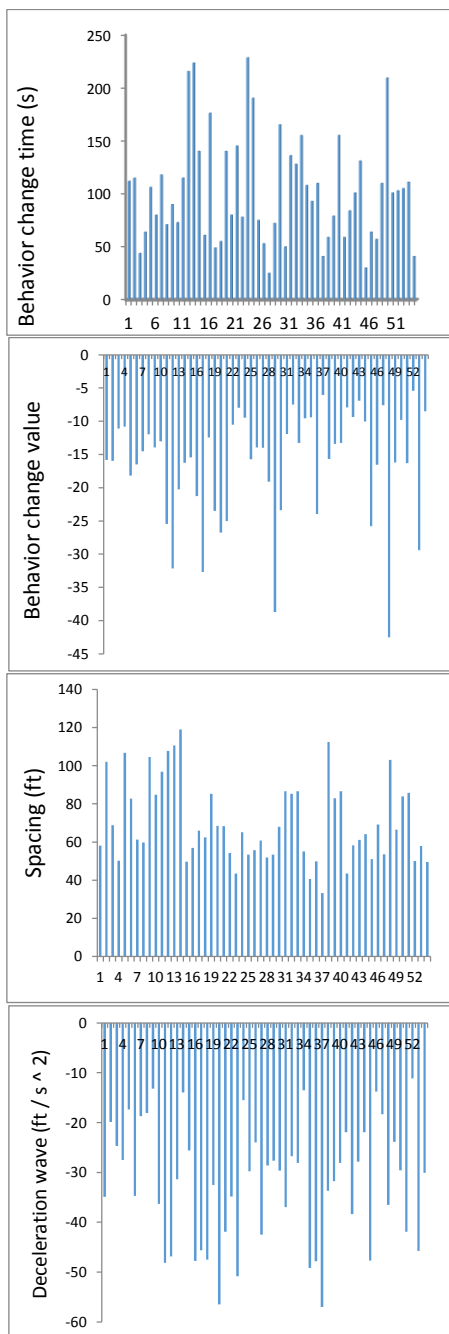


Fig. 6. Input and output data based on under reaction pattern

۴- تحلیل نتایج

۴-۱ الگوی رفتاری روواکنشی

مطابق جدول (۲)، نتایج تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس ۴۹ واحد تصمیم‌گیری (وسیله نقلیه پیرو) در زمان دریافت موج کاهش شتاب بر اساس الگوی رفتاری روواکنشی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که راننده روواکنشی به دلیل تمایل

۳-۲ داده‌های ورودی و خروجی بر اساس الگوی رفتاری

زیرواکنشی

داده‌های ورودی و خروجی برای هر واحد تصمیم‌گیری بر اساس داده‌های NGSIM، پس از تفکیک الگوی رفتاری زیرواکنشی در شکل (۶) ارائه شده است.

به عدم کاهش سرعت و مهارت و توانایی رانندگی در سرفاصله مکانی کم، متناسب با سرفاصله مکانی و سرعت موج کاهش شتاب، وضعیت بهینه انحراف رفتار از رفتار راننده ایده‌آل (نوول) را در واحد تصمیم‌گیری شماره یک دارد. به عبارت دیگر، راننده روواکنشی هرچقدر که متمایل به تثبیت الگوی رفتاری خود می‌شود، در زمان دریافت موج کاهش شتاب، افت سرعت کم‌تری دارد و زمان توقف کم‌تری در فاز کاهش شتاب ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که انحراف رفتار راننده روواکنشی بیانگر تمایل و ثبات حرکت راننده پیرو بر اساس الگوی رفتاری خود است. راننده روواکنشی در هریک از ورودی‌های متناسب با مقادیر (سرعت و سرفاصله مکانی و موج کاهش شتاب)، می‌تواند بیشترین مدت زمان را بر اساس الگوی رفتاری خود به حرکت در فاز کاهش شتاب ادامه دهد.

همچنین در ادامه حرکت تعقیب خودرو بر اساس الگوی رفتاری و به منظور تمایل به ادامه حرکت خود، سرفاصله مکانی و سرعت خود با وسیله پیشرو را متناسب با سرعت موج دریافتی تغییر می‌دهد تا بتواند مدت زمان بیشتری به حرکت خود بر اساس الگوی رفتاری خود ادامه دهد. به عبارت دیگر، مقادیر متفاوت سرفاصله مکانی و سرعت موج کاهش شتاب در سرعت‌های مختلف وسیله نقلیه پیرو برای وسایل نقلیه متفاوت در حرکت تعقیب خودرو در جدول (۲) ارائه می‌شود تا متناسب با ورودی‌های مختلف مقدار تغییر و زمان تغییر رفتار راننده پیرو برای وسایل نقلیه پیرو مختلف مشخص شود. تمایل حرکت پیرو بر اساس ثبات الگوی رفتاری خود بیانگر میزان کارآیی رفتار راننده پیرو وسایل نقلیه مختلف و سایر پارامترها است.

جدول ۲. خروجی تغییر رفتار واحدهای تصمیم‌گیری بر اساس الگوی رفتاری روواکنشی

Over reaction pattern		Inputs		Outputs		Efficiency
Number of decision units	Follower speed	Follower spacing receiving the wave	Deceleration wave	Behavioral change time	Behavioral change value	
1	9.8	36.69	-19.18	20	14.40	0.83
2	10.14	33.88	-19.58	97	12.40	0.80
...	...	...	...	...	...	...
33	17.39	29.25	-6.12	77	16.43	1
...	...	...	...	...	...	...
48	15.70	30.27	-28.53	146	10.65	1
49	35.74	70.84	-30.58	240	3.5	0.47

Table 2. Behavior change outputs of decision-units based on over reaction pattern

شکل ۷. نمودار کارآیی برحسب واحدهای تصمیم‌گیری بر اساس الگوی رفتاری روواکنشی

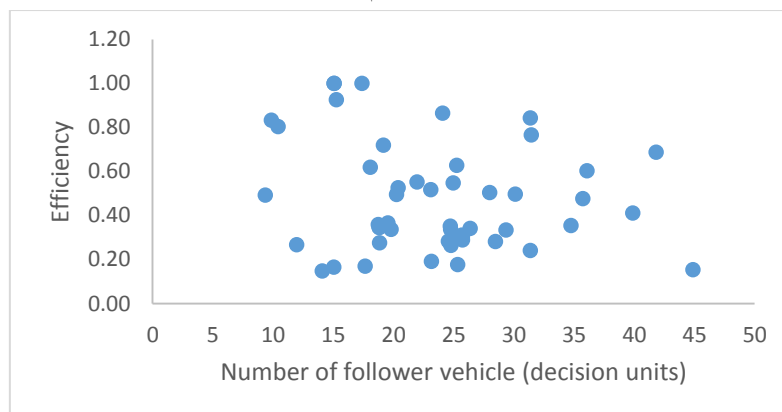


Fig. 7. Efficiency chart of decision units based on over reaction pattern

شکل ۸. بردارهای ورودی و خروجی بر اساس الگوی رفتاری روواکنشی تمام واحدها

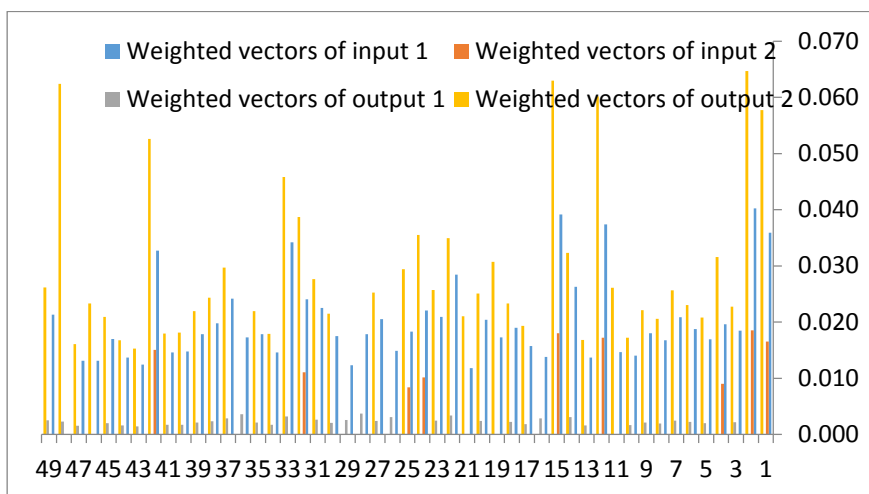


Fig. 8. Input and output vectors of all units based on over reaction

بیشتر نسبت به رفتار راننده ایده‌آل (نول) دارد، در زمان دریافت موج کاهش شتاب در سرفاصله‌های مکانی متناسب با دریافت موج راننده پیرو افت سرعت بیشتری نسبت به راننده ایده‌آل می‌دهد که منجر به افزایش زمان کاهش شتاب و تأخیر بیشتر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. مقادیر پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول (۳) برای هر وسیله نقلیه پیرو متناسب با موج دریافتی در سرفاصله مکانی در زمان دریافت موج کاهش شتاب منجر به ایجاد بیشترین انحراف رفتار و تأخیر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. پس نقاط به‌دست‌آمده، بحرانی‌ترین نقاط به منظور ایجاد تأخیر در الگوی رفتاری زیرواکنشی است و سایر رانندگان پیرو به منظور اجتناب از نقاط بحرانی و ایجاد تأخیر کم‌تر در زنجیره حرکات وسایل نقلیه باید از میزان تغییرات خود را به‌گونه‌ای تنظیم کنند تا تأخیر کم‌تری در زنجیره ایجاد کنند. همچنین، در این الگو برخلاف الگوی رفتاری روواکنشی، راننده زیرواکنشی بیشترین زمان حرکت بر اساس الگوی رفتاری خود را، تقریباً در یک افت سرعت برابر و سرفاصله مکانی و سرعت متفاوت ایجاد می‌شود. نتایج کارایی هر واحد تصمیم‌گیری بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی مطابق شکل (۹) و بردارهای وزنی برای الگوی رفتاری زیرواکنشی مطابق شکل (۱۰) ارائه می‌شود.

به ازای پارامترهای ورودی سرفاصله مکانی و موج دریافتی، راننده پیرو می‌تواند به حرکت خود به دلیل توانایی راندگی بر اساس الگوی رفتاری خود ادامه دهد و تمایلی به افت سرعت ندارد که منجر به کاهش سرعت کم‌تر در زنجیره حرکت وسایل نقلیه شود. در صورتی که سایر رانندگان بخواهند زمان بیشتری را بر اساس الگوی رفتاری خود انجام دهند باید سرفاصله مکانی یا موج کاهش شتاب دریافتی را به میزانی تغییر دهند تا به رفتار راننده روواکنشی با کارایی یک نزدیک شوند و تأخیر کم‌تری در زنجیره وسایل نقلیه ایجاد کنند. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده برای الگوی رفتاری راننده روواکنشی در سرفاصله مکانی و سرعت تقریباً مشابه، کم‌ترین افت سرعت ایجاد می‌شود. نتایج کارایی هر واحد تصمیم‌گیری مطابق شکل (۷) و بردارهای وزنی برای الگوی رفتاری مطابق شکل (۸) ارائه می‌شود.

۴-۲ الگوی رفتاری زیرواکنشی

نتایج تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس ۵۴ مدل تصمیم‌گیری (وسیله نقلیه پیرو با شماره‌های مختلف) در زمان دریافت موج کاهش شتاب بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی در جدول (۳) نشان می‌دهد که راننده زیرواکنشی که بر اساس الگوی رفتاری خود تمایل به افت سرعت و افزایش سرفاصله مکانی

جدول ۳. خروجی تغییر رفتار واحدهای تصمیم‌گیری بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی

Under reaction pattern		Inputs		Outputs		Efficiency
Number of decision units	Follower speed	Follower spacing receiving the wave	Deceleration wave	Behavioral change time	Behavioral change value	
1	35.9	58	-34.9	112	-15.80	0.36
2	33.91	102	-19.86	115	-15.98	0.21
3	33.32	68	-24.72	44	-11.12	0.12
...	...	...	...	...	...	...
23	25.15	43.42	-50.83	228	-7.96	1
...	...	...	...	...	...	...
37	14.80	33.23	-57.30	41	-6.03	1
...	...	...	...	...	...	...
53	16.29	57.91	-45.75	111	-29.4	0.365
54	19.34	49.49	-30.10	41	-8.50	0.15

Table 3. Behavior change outputs of decision-units based on under reaction pattern

شکل ۹. نمودار کارایی برحسب واحدهای تصمیم‌گیری بر اساس الگوی رفتاری

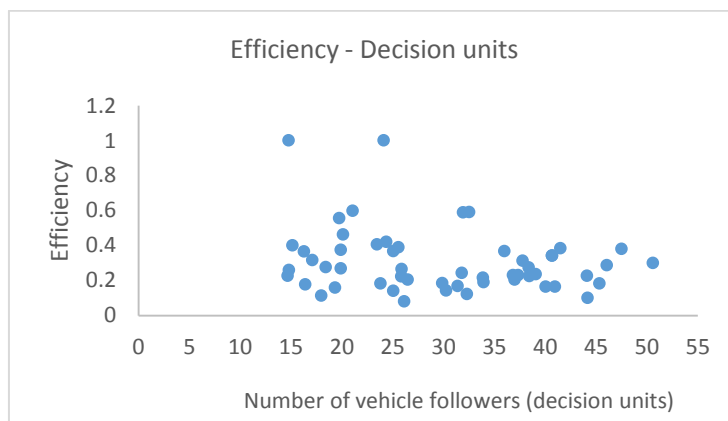


Fig. 9. Efficiency chart of decision units based on under reaction pattern

شکل ۱۰. بردارهای ورودی و خروجی بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی

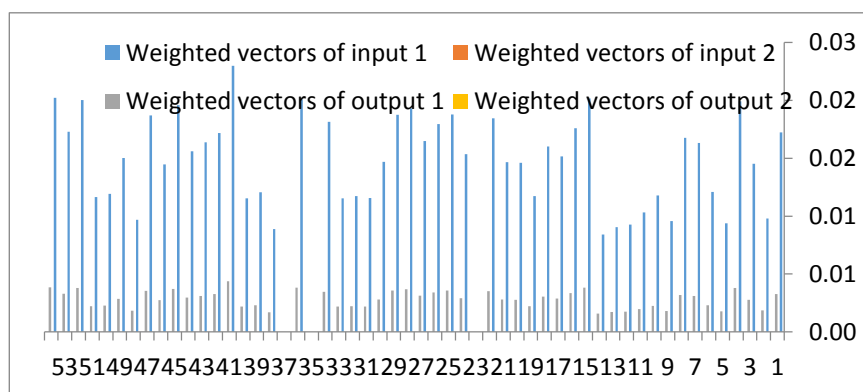


Fig. 10. Input and output vectors based on under reaction pattern

۵- نتیجه‌گیری

می‌شود. زمانی که وسیله نقلیه پیرو موج کاهش شتاب را دریافت می‌کند، راننده پیرو بر اساس الگوی رفتاری پاسخ‌های متفاوتی به موج کاهش شتاب دریافتی نشان می‌دهد. در این

افت سرعت ناگهانی وسیله نقلیه پیرو در آزادراه‌ها منجر به انتشار موج کاهش شتاب از جریان پایین‌دست به بالادست

هوشمند به وسیله نقلیه پیرو در موقعیت‌های رانندگی ناایمن استفاده شود تا در وضعیت‌های مختلف و با شبیه‌سازی رفتار در حال حرکت وسیله نقلیه پیرو، واکنش ادامه حرکت ایمن وسیله نقلیه پیرو پیشنهاد شود.

۶- منابع

- 1- Bilbao-Ubillos J. 2008 The costs of urban congestion: estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link roads. *Transportation Research Part A*, 42 (8), 1098–11082.
- 2- Zheng Z., Ahn S. & Monsere C. M. 2010 Impact of traffic oscillations on freeway crash occurrences. *Accident Analysis and Prevention*, 42 (2), 626–636.
- 3- Laval J. A. & Daganzo C. F. 2006 Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B*, 40 (3), 251–264.
- 4- Ahn S. & Cassidy M. 2006 Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change manoeuvres. In: Heydecker. 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 48 (6), 241–254.
- 5- Mauch, M. & Cassidy M. J. 2002. Freeway traffic oscillations: observations and predictions. The 15th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, 653–673.
- 6- Zheng Z. , Ahn S. , Chen D. & Laval J. 2011 Applications of wavelet transform for analysis of freeway traffic: bottlenecks, transient traffic, and traffic oscillations. *Transportation Research Part B*, 45 (2), 372–384.
- 7- Zheng Z. , Ahn S. , Chen D. & Laval J. A. 2011b Freeway traffic oscillations: microscopic analysis of formations and propagations using wavelet transform. The 19th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, 55 (8), 717–731.
- 8- Laval J. A. 2005 Linking synchronized flow and kinematic wave theory. In: Schadschneider, A. , Poschel, T. , Kuhne, R. , Schreckenberg, M. , Wolf, D. (Eds.), *Traffic and Granular Flow '05*. Springer, 12 (14), 521–526.
- 9- Koshi M. , Kuwahara M. & Akahane H. 1992 Capacity of sags and tunnels in japanese motorways. *ITE Journal*, 45 (7), 17–22.
- 10- Laval J. A. 2006 Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. *Transportation Research Record* 1988, 22 (2), 86–91.
- 11- Edie L. C. 1961 Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic. *Operations Research*, 1 (9), 66–76.

مقاله الگوهای رفتاری راننده پیرو بر اساس تئوری نامتقارن رفتاری در فاز کاهش شتاب مشخص می‌شوند. هر راننده پیرو بر اساس الگوی رفتاری خود کاهش شتاب بیشتر یا کم‌تری نسبت به راننده ایده‌آل، نوول، از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در نقطه واکنش، راننده پیرو به سمت راننده ایده‌آل، نوول، تغییر رفتار می‌دهد. با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و انتخاب هر وسیله نقلیه پیرو در زمان دریافت موج کاهش شتاب به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیری، مقادیر موج کاهش شتاب و سرفاصله مکانی وسیله نقلیه پیرو به‌عنوان ورودی هر واحد تصمیم‌گیری، مقدار بهینه انحراف رفتار و زمان در نقطه واکنش برای هر وسیله نقلیه بر اساس هر الگوهای رفتاری تحلیل می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در الگوی رفتاری راننده واکنشی کارآترین واحد تصمیم‌گیری به منظور ایجاد کم‌ترین تأخیر در زنجیره وسایل نقلیه در مقادیر سرفاصله مکانی و سرعت تقریباً مشابه اما با مقدار موج کاهش شتاب و تغییر رفتار متفاوت ایجاد می‌شود. تأخیر کم‌تر در زنجیره وسایل نقلیه در الگوی رفتاری زیاد تحت تأثیر موج کاهش شتاب منتشرشده در زنجیره است. سایر رانندگان پیرو بر اساس این الگوی رفتاری به منظور ایجاد کردن تأخیر در زنجیره وسایل نقلیه باید سعی کنند که سرعت یا سرفاصله مکانی خود را به مقادیر ایده‌آل نزدیک کنند. اما، بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی، تمایل به تثبیت الگوی رفتاری خود منجر به افت سرعت و تأخیر بیشتر در زنجیره وسایل نقلیه می‌شود. نتایج تحلیلی پوششی داده‌ها در این الگوی رفتاری بیانگر بیشترین تأخیر در زنجیره متناسب با سرعت‌ها و سرفاصله‌های مکانی مختلف و سرعت موج‌های مشابه است که بیانگر ناکارآترین وضعیت رانندگی وسیله نقلیه پیرو در زنجیره وسایل نقلیه است. در این الگوی رفتاری موج کاهش شتاب منتشرشده تأثیری بر تغییر رفتار راننده پیرو ندارد و راننده پیرو تحت تأثیر سرفاصله مکانی و قدرت مانور ذاتی به ادامه حرکت خود ادامه می‌دهد. لازم به ذکر است که رانندگان وسایل نقلیه پیرو بر اساس الگوی رفتاری زیرواکنشی به منظور تأخیر کم‌تر در زنجیره وسایل نقلیه و تأمین سرفاصله مکانی ایمن باید در مقادیری متفاوت از نتایج به‌دست‌آمده رانندگی کنند. همچنین این روش می‌تواند به منظور طراحی ابزارهای اطلاع‌رسانی

- 20- Zhang H. M. 1999 A mathematical theory of traffic hysteresis. *Transportation Research Part B*, 33 (17), 11-23.
- 21- Zhang, H. M. & Kim T. 2005 A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow. *Transportation Research Part B*, 39 (9), 385-399.
- 22- Yeo H. & Skabardonis A. 2009 Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory, *Transportation and Traffic theory*, 28(7), 99-115.
- 23- Laval A. J. 2010 Hysteresis in Traffic Flow revisited: An improved measurement method, *Transportation Research, Part B*, 45 (2), 385-391.
- 24- Ahn S. , Vadlamani S. & Laval J. A. 2012 A method to account for non-steady conditions in measuring traffic hysteresis. *Transportation Research Part C*, 34 (28) , 138-147.
- 25- NGSIM. Accessed at: <http://ngsim-community.org/>
- 26- Trajectory Explorer. Accessed at: <http://trafficlab.ce.gatech.edu/tools.html>
- 27- Rassafi A. A., Momeni F., Astarki Z. & Amini B. 2012 The application of multicriteria decision making in identifying hotspots: data envelopment and concordance analyses. *Journal of Transportation Engineering*. 301-314 (In Persian).
- 28- Behnod H., Pirayesh Neghab M. & Ayati E. 2013 Creating a fuzzy decision support system in managing and planning road safety measures. *Journal of Transportation Engineering*. 183-199 (In Persian).
- 29- Hesami S., Hashemi K., Sareh S & Javanshir., H. 2010 Evaluation of public transportation performance and application of data envelopment analysis method in this evaluation. 11 Conference on Transportation and Traffic (In Persian).
- 12- Laval J. , Chen D. , Amer K. , Guin A. & Ahn S. 2009 Evolution of oscillations in congested traffic. *Transportation Research Record* 2124, 23 (1), 194-202.
- 13- Ahn S. , Cassidy M. J. & Laval, J. 2004. Verification of a simplified car-following theory. *Transportation Research Part B*, 38 (5), 431-440.
- 14- Ahn S. , 2005 Growth of Oscillations in Queued Traffic. Ph. D. Thesis, Depart. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- 15- Wilson R. E. 2008 Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366(1872), 2017-2032.
- 16- Wilson R E. & Ward, J. A. 2011 Car-following models: fifty years of linear stability analysis – a mathematical perspective. *Transportation Planning and Technology*, 34 (1), 3-18.
- 17- Treiber M. & Kesting, A. 2011 Evidence of convective instability in congested traffic flow: a systematic empirical and theoretical investigation. *The 19th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, 25 (15), 698-716.
- 18- Treiterer J. & Myers, J. A. 1974 The hysteresis phenomenon in traffic flow. In: Buckley D. J. (Ed.), *Proceedings of the 6th Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, 32 (22) 213-219.
- 19- Newell G. F. 1962 Theories of instability in dense highway traffic. *Journal of the Operations Research Society of Japan* 5, 25(5), 39-54.

Evaluation of Behavior Diversion of Follower Driver to Newell's Driver in Traffic Oscillation based on Data Envelopment Analysis

Arsalan Salehikalam¹, Ali Abdi Kordani², Amir Abbas Rassafi*²

1. Ph.D. Student, School of Engineering, Imam Khomeini International University.

2. Associate professor, Imam Khomeini International University.

rasafi@eng.ikiu.ac.ir

Abstract

Stimulating the following vehicles by the leading ones repeatedly is created by the different reasons such as a sudden drop in the speed of the leading vehicle and lane changing maneuvers that result in stop and go traffic. It leads to several negative effects, such as reduction in safety, and increase in travel delay. When follower driver of platoon receives the last released wave of downstream to upstream in the traffic oscillation, he or she makes different reactions with respect to the released wave. They result in forming different behavioral patterns and behavior diversion from equilibrium driver. The behavior change analysis of the driver-vehicle unit is an indispensable factor for increasing and decreasing frequent repetitions in traffic oscillation. In this paper, employs vehicle trajectory data from Next Generation Simulation (NGSIM) program. The vehicle trajectory data of two freeway sites of the NGSIM program, Interstate 80 (I-80) and US highway 101 (US-101), were used in transportation and traffic research (NGSIM, 2006). Platoons of vehicles identified through a traffic disturbance classify in deceleration phase based on driver behavior. When the follower vehicle receives a deceleration wave, the follower's reaction may be to create a high or low speed drop. Driver behavior in deceleration phase leads to congestion classify into four behavioral patterns: under reaction and over reaction based on maneuvering errors of follower driver. Follower vehicles react different responses to deceleration wave in deceleration phase. The reactions result in low and more speed drop between Newell driver, low and more delay time of moving vehicles. A high speed drop, more safe spacing, results in the development of under reaction pattern. Also, a low speed drop, lower safe spacing, results in over reaction. In this paper, behavior diversion parameter and time of deceleration phase are assessed, based on observed behavioral patterns and using data envelopment analysis. Follower vehicles with different numbers in traffic stop and go traffic is considered as decision making units, leading to different decision-making units in the vehicle platoon. Using data envelopment analysis method, efficient units for trajectory data are analyzed, which is based on any behavior that indicates the delay in the vehicle platoon. More performance of behavior diversion parameter and time as result of any decision making unit are identified based on any diffused deceleration wave and follower spacing of receiving deceleration wave that results in the lowest delay time of vehicle platoon of deceleration phase. The results of the analysis show that the most effective decision making unit of overreaction behavioral pattern is created in the vehicle platoon at the same spacing and velocity values but the amount of different acceleration wave and behavioral changes. Based on under reaction pattern, the greatest delay in the platoon is proportional to the different speeds and spacing but the same deceleration wave which represents the most inefficient driving situation of a vehicle following the vehicle platoon. Present results can help traffic engineers in simulating vehicles movements of freeways to evaluate vehicle moves of F level of service for calculating delay and speed drop of vehicle platoon.

Keywords: Stop and go traffic, Behavioral diversion, Behavioral patterns, Data envelopment analysis.