

## بررسی ویژگی‌ها و عوامل مؤثر بر هیستریزیس جریان ترافیک

حسین عبدالهی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
میثم اکبرزاده (مسئول مکاتبات)، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

**E-mail: makbarzadeh@iut.ac.ir**

### چکیده

زمانی که یک خودرو در نوسان ترافیکی قرار می‌گیرد، انطباق با شرایط نوسان (تعادل جدید) با تأخیر (به دلیل زمان درک و واکنش راننده) و سرعتی متناهی (به دلیلی ویژگی‌های مکانیکی خودرو) انجام می‌شود. عدم یکسانی منحنی کاهش و افزایش سرعت بر اثر تغییرات چگالی را هیستریزیس می‌نامند. از سوی دیگر، شتاب و سرعت خودرو در معادلات مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها از عناصر تعیین‌کننده هستند. از این منظر پدیده هیستریزیس را می‌توان بر میزان پاک و بهره‌ور بودن حمل‌ونقل شهری مؤثر دانست. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ویژگی‌های حلقه‌های هیستریزیس با رفتار رانندگان در ارتباط است. به‌طور مثال رفتار پرخاشکرایانه باعث خلق حلقه‌های منفی و رفتار محتاطانه باعث به وجود آمدن حلقه‌های مثبت می‌شوند. در این مقاله با بررسی پژوهش‌های مرتبط پیشین، ویژگی‌های هیستریزیس و عوامل مؤثر بر آن بیان شده است. همچنین مشخص شد که مهم‌ترین عامل بروز حلقه هیستریزیس مشخصات و عوامل انسانی مانند مشخصات ذاتی، توانایی‌های ذهنی، رفتار تهاجمی یا محتاط و همچنین انتظار راننده از جریان ترافیک و انطباق شرایط راننده با جریان ترافیک است.

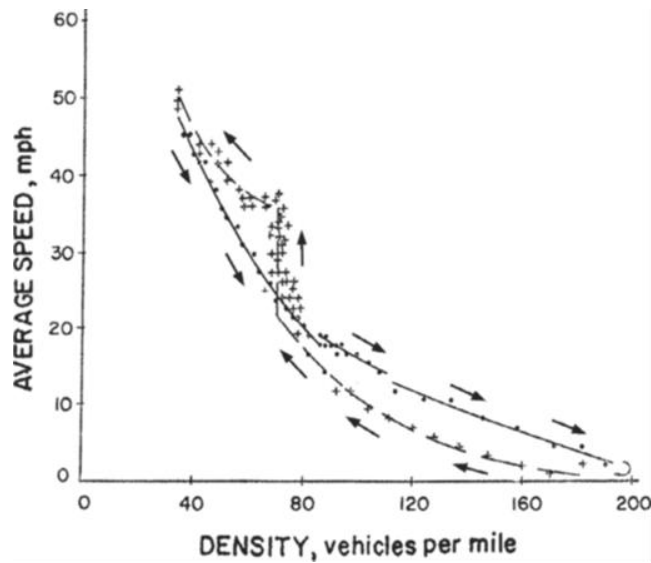
واژه‌های کلیدی: هیستریزیس، رفتار ترافیکی، جریان ترافیک، حمل‌ونقل پاک

## ۱. مقدمه

ژنگ در سال ۱۹۹۹ جریان ترافیک را به سه فاز شتاب، کاهش سرعت و تعادل تقسیم کرد و نشان داد انتقال در رابطه سرعت - چگالی در فازهای مختلف باعث به وجود آمدن حلقه‌های هیستریزیس می‌شود. یثو و اسکاباردنیس در سال ۲۰۰۹ شرایط ترافیک را به پنج قسمت تقسیم کردند: جریان آزاد، افزایش سرعت، کاهش سرعت، حرکت روان و سکون. آنها نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که عدم تقارن بین شتاب و کاهش سرعت باعث به وجود آمدن هیستریزیس می‌شود. بر اساس مطالعه آنها حلقه‌های خلاف عقربه‌های ساعت<sup>۴</sup> به وجود نخواهد آمد که این امر با شواهد میدانی مطابقت ندارد. ونگ در سال ۲۰۰۲ معتقد بود که ترکیب ناهمگن رانندگان باعث به وجود آمدن حلقه‌های هیستریزیس می‌شود. نیول در سال ۱۹۶۵ مقررات رانندگی را یکی از دلایل عدم تقارن در شتاب و کاهش سرعت خودروها می‌دانست و یثو و اسکاباردنیس در سال ۲۰۰۹ خطاهای انسانی، مانورهای رانندگی و انتظار و پیش‌بینی رانندگان را از عوامل ایجاد حلقه‌های هیستریزیس برشمردند. لوال و لکلرک در سال ۲۰۱۰ شکل‌گیری و انتشار اختلالات را به رفتار پرخاشگرایانه و محتاط رانندگان در مدل‌های خود نسبت دادند. تریتر و میرس در سال ۱۹۷۴ با استفاده از مقادیر متوسط فواصل ارتباط بین چگالی - سرعت، چگالی - تردد، چگالی - انرژی حرکتی و چگالی - فاصله زمانی متوسط را بررسی کردند. به‌طور مثال همان‌گونه که در شکل شماره ۱ مشخص است نمودار چگالی - سرعت متوسط دو حلقه در اثر عدم تقارن بین شتاب افزایشی و کاهشی تشکیل شده است.

پیامدهای ازدحام‌ها و نوسانات ترافیکی مانند افزایش زمان و هزینه‌های سفر، کاهش میزان کارایی زیرساخت‌ها، افزایش مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها مورد توجه محققان حمل‌ونقل است. از این رو شناخت مؤثر ویژگی‌های ازدحام و نوسانات ترافیکی برای کاهش این پیامدها مهم است. نمودار اساسی جریان ترافیک (رابطه بین سرعت و چگالی و همچنین حجم تردد برای یک گروه از خودروها) در شرایط نوسان در تردد دارای حلقه‌هایی است که به آنها هیستریزیس<sup>۱</sup> یا پسماند گویند. وقوع و نوع هیستریزیس مرتبط با رفتار رانندگان در زمان نوسان و زمان شروع واکنش آنها در زمان موج کاهش سرعت است. رفتار راننده بسته به اینکه کجای شرایط نوسان قرار دارد متفاوت است. به همین دلیل جهت به دست آوردن ویژگی‌های واقعی ازدحام<sup>۲</sup> نیاز به مدل‌های مختلف تعقیب خودرو<sup>۳</sup> در جاهای متفاوت نوسان است. به تعبیر دیگر زمانی که یک گروه خودرو به یک نوسان ترافیکی می‌رسند شرایط قبل از نوسان با سرعت کمی بازیابی می‌شود. تأخیر در بازیابی سرعت زمانی که خودرو از نوسان خارج می‌شود را هیستریزیس می‌نامند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که انواع هیستریزیس با رفتار رانندگان در ارتباط است. به‌طور مثال رفتار پرخاشگرایانه باعث خلق حلقه‌های منفی و رفتار محتاطانه باعث به وجود آمدن حلقه‌های مثبت می‌شوند. به‌صورت کلی تأخیر در بازیابی سرعت باعث به وجود آمدن هیستریزیس می‌شود. نیول در سال ۱۹۶۵ عدم تقارن بین شتاب افزایشی و کاهشی خودرو را دلیل عمده این پدیده معرفی کرد.

## بررسی ویژگی‌ها و عوامل مؤثر بر هیستریزس جریان ترافیک

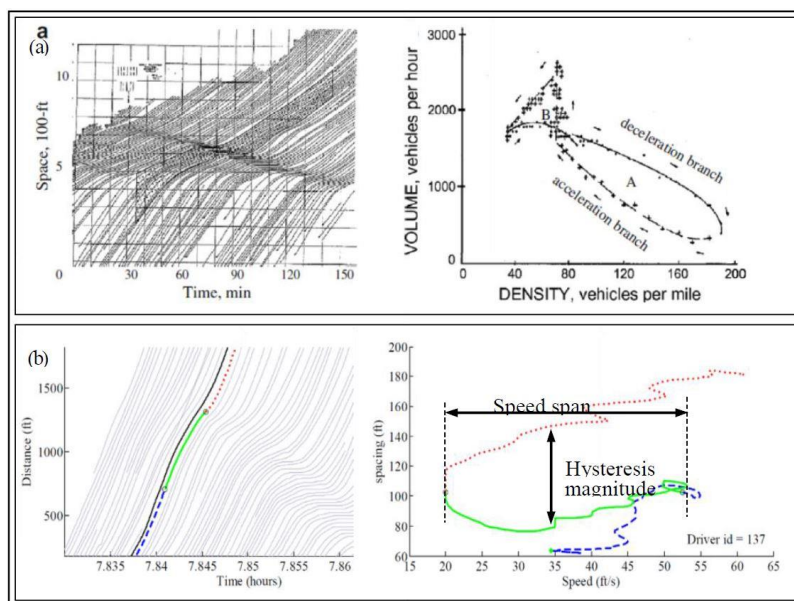


شکل ۱. نمونه‌ای از حلقه‌های هیستریزس

تردد در شاخه‌های افزایش و کاهش سرعت در یک چگالی مشخص در نمودار تردد-چگالی در نظر می‌گیرد که این روش برای خودروها به صورت گروهی و تحقیق در مورد هیستریزس در سطح ماکروسکوپی مناسب است. همان‌طور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است روش دوم با توجه به رابطه سرعت-فاصله، اختلاف متوسط سرفاصله بین مراحل افزایش و کاهش سرعت در یک حلقه را مقدار هیستریزس معرفی می‌کند که این روش در تحلیل میکروسکوپی استفاده می‌گردد.

## ۲. ویژگی‌های هیستریزس

نیول (۱۹۶۲) معتقد بود در نمودار چگالی-تردد شاخه کاهش سرعت بالای شاخه افزایش سرعت قرار می‌گیرد. ژنگ (۱۹۹۹) معتقد بود این شاخه‌ها ممکن است یکدیگر را قطع کرده و جابجا شوند. قرار گرفتن شاخه افزایش سرعت بالای کاهش سرعت به دلیل رفتارهای انسانی (پرخاشگرانه و محتاطانه) می‌تواند رخ دهد. در این زمینه دو روش اندازه‌گیری میزان هیستریزس مطرح شده است. روش اول مقدار هیستریزس را اختلاف بین میزان



شکل ۲. اندازه‌گیری هیستریزس

فصلنامه مهندسی ترافیک / سال بیست و یکم / شماره ۸۴ / بهار ۱۴۰۰

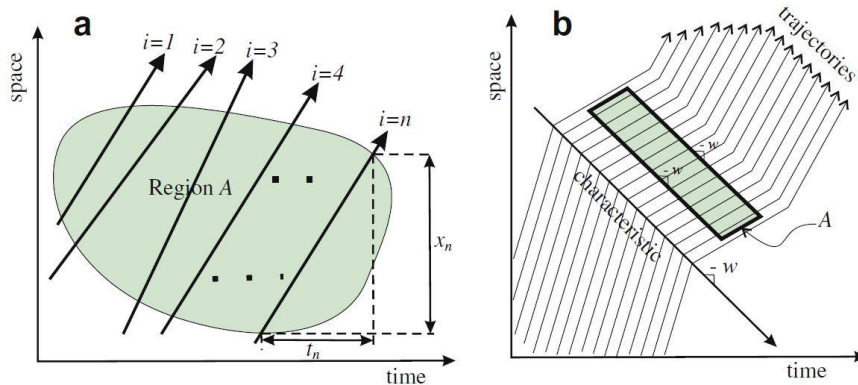
همان‌طور که در شکل شماره ۳ مشخص است در این معادلات  $k$  و  $q$  به ترتیب چگالی، تردد و سرعت،  $|A|$  مساحت ناحیه  $A$  و  $t_i$  و  $x_i$  به ترتیب زمان سفر و مسافت سفر خودرو است. شکل شماره ۴ نشان‌دهنده تحقیق تریتر و میرس و مقادیر مورد استفاده در تحقیق لاوال در سال ۲۰۱۱ است. در این شکل دو حلقه وجود دارد. حلقه  $A$  نشان‌دهنده کاهش سرعتی که باعث بروز اختلال می‌شود و افزایش سرعتی که باعث بازگشت به تعادل می‌شود است. حلقه  $B$  نشان‌دهنده بازگشت به حالت تعادل است تمرکز لاوال روی بررسی حلقه  $A$  است.

طبق تعاریف ادی پارامترهای زیر در معادلات ۱ تا ۳ برای یک گروه خودرو  $n$  در یک ناحیه مشخص  $A$  در نمودار زمان-فاصله مکانی تعریف می‌شوند.

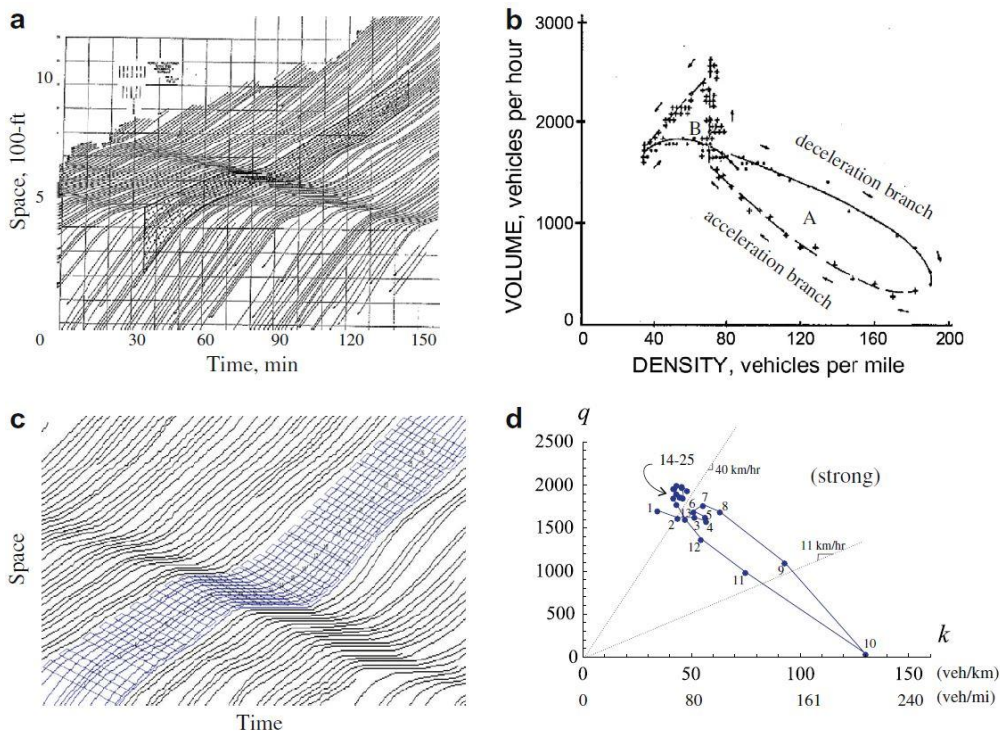
$$k = \sum_{i=1}^n t_i / |A| \quad (1)$$

$$q = \sum_{i=1}^n x_i / |A| \quad (2)$$

$$v = \sum_{i=1}^n x_i / \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$



شکل ۳. ناحیه مورد بررسی در خطوط سیر



شکل ۴. مقایسه خطوط سیر مورد بررسی در تحقیق لاوال و تریتر

به همین ترتیب به دلیل وجود فاصله مکانی زیاد در پایان پدیده راننده محتاط شتاب بیشتری نسبت به راننده پرخاشگر می‌تواند بگیرد.

#### ۴. تأثیر عوامل انسانی بر هیستریزس

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که انواع هیستریزس با رفتار رانندگان در ارتباط است. به‌طور مثال رفتار پرخاشگرایانه باعث خلق حلقه‌های منفی و رفتار محتاطانه باعث به وجود آمدن حلقه‌های مثبت می‌شوند. ونگ در سال ۲۰۰۲ معتقد بود که ترکیب ناهمگن رانندگان باعث به وجود آمدن حلقه‌های هیستریزس می‌شود. نیول در سال ۱۹۶۵ مقررات رانندگی را یکی از دلایل عدم تقارن در شتاب و کاهش سرعت خودروها می‌دانست و یثو و اسکاباردونیس در سال ۲۰۰۹ خطاهای انسانی، مانورهای رانندگی و انتظار و پیش‌بینی رانندگان را از عوامل ایجاد حلقه‌های هیستریزس برشمردند. لاوال و لکلرک در سال ۲۰۱۰ شکل‌گیری و انتشار اختلالات را به رفتار پرخاشگرایانه و محتاط رانندگان در مدل‌های خود نسبت دادند.

##### ۴-۱ رفتار پرخاشگرایانه و محتاط

در سال ۲۰۱۲ چن و همکاران از مدل تعقیب خودرو نیول در سال ۲۰۰۲ که رابطه بین سرعت و فاصله مکانی خودروها را ارائه کرده است در تحقیق خود استفاده کردند. در این مدل خط سیر یک راننده همانند راننده جلویی با اختلاف زمانی  $t$  و اختلاف مکانی  $d$  است.  $t$  زمان انتقال موج بین دو راننده متوالی و  $d$  فاصله مکانی در حالت ایستای ترافیک است. ( $d_i$  و  $\tau_i$ ) برای هر راننده تابع زمان است ولی می‌توان ثابت در نظر گرفت. این دو پارامتر بر پارامترهای مدل KWT منطبق هستند. طبق این مدل  $d = \frac{1}{k}$  و  $\tau = \frac{1}{wk}$  است که  $w$  سرعت موج و  $k$  چگالی حالت ایستای ترافیک است. لاوال و لکلرک در سال ۲۰۱۰ در تحقیق خود مقدار ( $d_i$  و  $\tau_i$ ) را با در نظر گرفتن  $\eta_i(t)$  طبق معادله ۴ متغیر در نظر گرفتند.

$$\eta_i(t) = \frac{\tau_i(t)}{\tau} \quad (4)$$

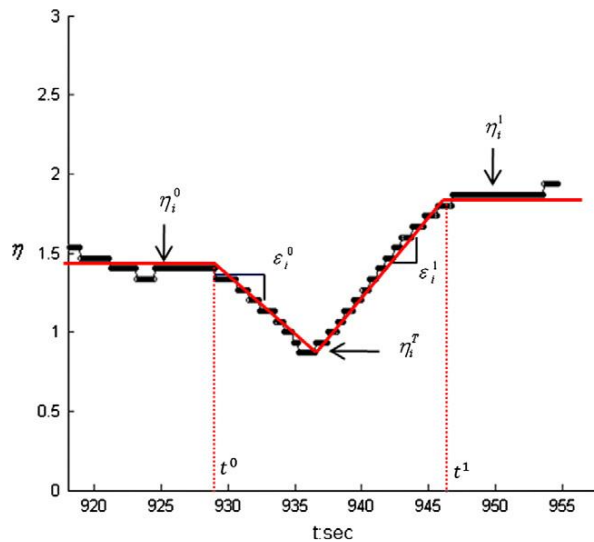
در قسمت c و d شکل شماره ۴ تعاریف در ناحیه A مشخص شده‌اند که اختلاف تردد در چگالی کمتر، بیشتر از چگالی بالا است. حلقه هیستریزس در این تحقیق کوچک‌تر از حالت قبل است و روش حاضر حالت قفل‌شدگی را نیز نشان داده است. در تحقیق لاوال سطوح و اندازه هیستریزس در گروه‌های موردنظر به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده است. اندازه هیستریزس به معنای اختلاف شاخه کاهش سرعت و افزایش سرعت در چگالی مشخص است. این طبقه‌بندی می‌تواند دلخواه باشد ولی در کل برای بررسی هیستریزس مفید است: سطح قوی شامل حلقه‌هایی با اختلاف تردد در هر چگالی مشخص بیشتر از ۳۰۰ وسیله در ساعت است. سطح ضعیف شامل حلقه‌هایی با اختلاف تردد در هر چگالی مشخص بین ۵۰ تا ۳۰۰ وسیله در ساعت است. سطح ناچیز شامل حلقه‌هایی با اختلاف تردد در هر چگالی مشخص کمتر از ۵۰ وسیله در ساعت است. سطح منفی زمانی رخ می‌دهد که شاخه افزایش سرعت بالاتر از کاهش سرعت قرار گیرد.

#### ۳. تأثیر ویژگی‌های ترافیک بر هیستریزس

در سال ۲۰۱۲ فوتینی و همکاران با استفاده از شبکه عصبی<sup>۵</sup> رابطه بین ویژگی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی جریان ترافیک و طبقه‌بندی‌های مختلف هیستریزس را تقریب زدند. همچنین عوامل تعیین‌کننده میزان هیستریزس با استفاده از طبقه‌بندی بر اساس شبکه‌های عصبی شناسایی شدند و با استفاده از آن مدل سهم هر یک از خصوصیات تأثیرگذار بر مقدار و نوع هیستریزس بررسی شد. تغییرات در فاصله مکانی در پایان پدیده هیستریزس و در شتاب خودرو عقبی در پایان پدیده مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده بر هیستریزس هستند.

مقدار بالای منفی اختلاف بین فاصله مکانی در ابتدای هیستریزس و انتهای آن نشان‌دهنده رفتار پرخاشگر و مقدار مثبت بالای آن نشان‌دهنده رفتار محتاط رانندگان است. همچنین فاصله مکانی زیاد در پایان پدیده نشان‌دهنده رفتار محتاطانه و فاصله مکانی کم در پایان پدیده نشان‌دهنده رفتار پرخاشگرایانه رانندگان است. فصلنامه مهندسی ترافیک / سال بیست و یکم / شماره ۸۴ / بهار ۱۴۰۰

بیشترین انحراف از حالت تعادل را نشان می‌دهد. زمانی که  $\eta_i^0 = 1$  رفتار راننده معمولی و بر اساس نمودار اساسی KWT است. در نتیجه می‌توان رفتار رانندگان را به صورت روبرو نشان داد.  $\eta_i^0 < 1$  رانندگان پرخاشگر،  $\eta_i^0 > 1$  رانندگان محتاط و  $\eta_i^0 = 1$  رانندگان معمولی را معرفی می‌کند. لازم به ذکر است منظور از پاسخ، تغییرات در  $\eta_i(t)$  است. بر این اساس الگوی پاسخ به نوسان تعریف می‌شود: (۱) مثلث مقعر  $(\eta_i^T > \eta_i^1)$  و  $(\eta_i^T > \eta_i^0)$  مثلث محدب  $(\eta_i^1 > \eta_i^T)$  و  $(\eta_i^0 > \eta_i^T)$  ثابت (۳)  $(\eta_i^0 \sim \eta_i^1 \sim \eta_i^T)$ .



شکل ۵. تغییرات  $\eta_i(t)$  در یک نوسان

است و در دوره پایدار حداقل سرعت به صفر میل می‌کند. نکات زیر از نتایج آماری دو دوره به دست آمده است:

۱- توزیع آماری هر دو دوره و ترکیب انواع رانندگان تقریباً یکسان است.

۲- بیشتر رانندگان حلقه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد را تجربه کرده‌اند ولی توزیع نوع هیستریزس در دو دوره متفاوت است.

۳- الگوی پاسخ رانندگان پرخاشگر در دوره رشد مقعر و غیر کاهشی و در دوره توسعه یافته مقعر است. رانندگان معمولی در دوره رشد تقریباً از هر چهار الگو پیروی می‌کنند ولی در دوره توسعه یافته بیشتر مقعر است. الگوی پاسخ رانندگان

در این معادله  $\tau_i(t)$  زمان واقعی انتقال موج بین دو راننده متوالی در زمان  $t$  و  $t$  مقدار آن در تعادل طبق مدل KWT است. در این تحقیق سرعت موج ثابت در نظر گرفته شده است و از آنجایی که  $d = zw$  است،  $\eta_i(t)$  معادل نسبت فاصله مکانی واقعی در زمان  $t$  به فاصله مکانی در تعادل است. در حالت تعادل مقدار  $\eta_i(t)$  ثابت است ولی در شرایط عدم تعادل زمانی که موج کاهش سرعت نوسان شروع می‌شود مقدار  $\eta_i(t)$  از حالت تعادل خارج می‌شود. مطابق شکل ۵،  $\eta_i^0$  و  $\eta_i^1$  مقدار  $\eta_i(t)$  به ترتیب در زمان قبل و بعد از شرایط عدم تعادل هستند و  $\eta_i^T$

جهت تحلیل و در نظر گرفتن نوع راننده، الگوی پاسخ و نوع هیستریزس از نمودار  $\eta$ - $v$  استفاده شده است. از آنجایی که  $\eta_i(t)$  با نسبت فاصله مکانی لحظه‌ای به فاصله مکانی در تعادل معادل است، جهت حلقه‌های هیستریزس در صفحه  $\eta$ - $v$  با  $v$ - $s$  (سرعت-چگالی) و  $v$ - $q$  (تردد-چگالی) برابر است. در این مطالعه پنج نوع حلقه هیستریزس ساعت‌گرد، پادساعت‌گرد، همپوشان، خط مستقیم و حلقه‌های چندگانه تعریف شده است که همپوشان و خط مستقیم باعث هیستریزس نمی‌شوند. یک اختلال به دو دوره رشد و توسعه یافتگی کامل تقسیم می‌شود. در دوره رشد حداقل سرعت خودرو در اختلال در حال کاهش

## بررسی ویژگی‌ها و عوامل مؤثر بر هیستریزس جریان ترافیک

محرک می‌تواند سرعت، فاصله مکانی، سرعت نسبی، سرعت مطلوب و شتاب باشد. در بسیاری از مراجع تابع سرعت برحسب فاصله مکانی  $V(b)$  ارائه شده است. یکی از محرک‌ها می‌تواند انحراف از سرعت ایده‌آل راننده باشد که پاسخ به این محرک به صورت معادله شماره ۶ بیان می‌شود.

$$\ddot{x}_r = \alpha(V(b) - v_r) \quad (6)$$

شتاب خودرو تعقیب‌کننده  $\ddot{x}_r$  سرعت کنونی با  $v_r$  و پارامتر حساسیت با  $\alpha$  نشان داده شده است و سرعت خودرو جلویی با  $v_p$  در معادله شماره ۷ بیان می‌شود.

$$\ddot{x}_r = \beta(v_p - v_r) \quad (7)$$

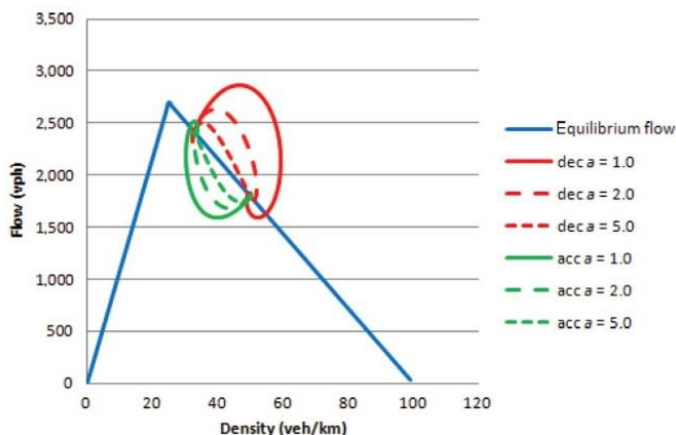
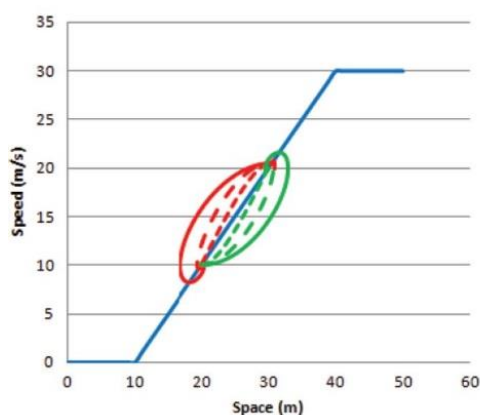
که  $\beta$  نیز ضریب حساسیت است. در حقیقت پاسخ راننده به صورت ترکیبی بر اساس معادله ۸ است.

$$\ddot{x}_r = \alpha(V(b) - v_r) - \beta(v_p - v_r) \quad (8)$$

در این تحقیق ترم اول معادله شماره ۸ که تمایل راننده به رسیدن به سرعت مطلوبش است انطباق فرض شده است و ترم دوم که پاسخ راننده به جریان ترافیک است انتظار در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تابع سرعت مطلوب در معادله شماره ۹ نشان داده شده است.

$$V(b) = \min \left[ \frac{b - b_{jam}}{T} \cdot v_{max} \right] \quad (9)$$

برای بررسی اثر انطباق بر هیستریزس از معادله شماره ۵ استفاده شده است. حالت‌های مختلف تغییر ترافیک در افزایش سرعت، کاهش سرعت و تعادل در شکل شماره ۸ نشان داده شده است.



شکل ۶. تغییرات حالات ترافیک در اثر انطباق

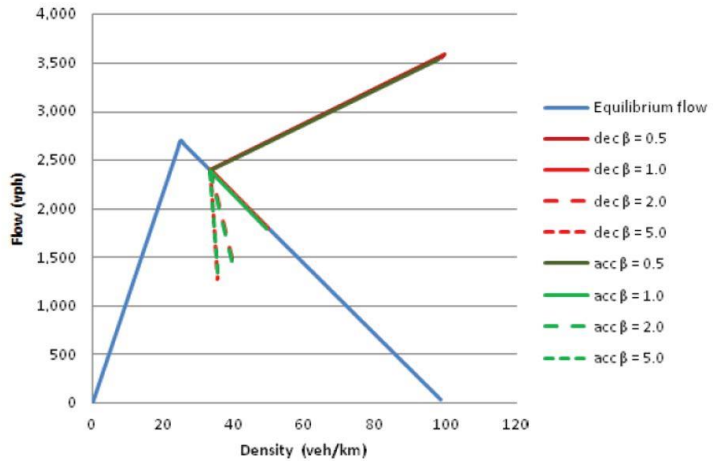
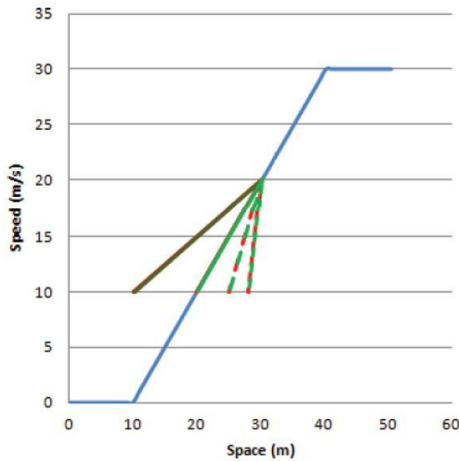
محتاط در دو دوره تفاوت چندانی ندارد و آنها معمولاً از الگوی محدب پیروی می‌کنند. توزیع الگوی واکنش برای انواع رانندگان متفاوت است پس نمی‌توان تعداد دسته را کاهش داد.

### ۴-۲ اثر انطباق و انتظار بر هیستریزس

اثر انطباق و انتظار بر هیستریزس توسط دنگ و ژنگ در سال ۲۰۱۵ مطرح شد. اثر انطباق که ناشی از زمان پاسخ راننده است، باعث تأخیر در جریان ترافیک شده و نشانگر واکنش‌های زمانی است. اثر انتظار نشان‌دهنده تخمین راننده از شرایط جریان بوده و نشانگر واکنش‌های مکانی است. در انطباق سرعت در زمان کاهش سرعت بیشتر از سرعت تعادلی و در زمان افزایش سرعت کمتر از سرعت تعادلی است که باعث تولید حلقه مثبت می‌شود. معکوس این حالت که حلقه منفی را شکل می‌دهد در اثر انتظار به وجود می‌آید. به دلیل ارتباط هیستریزس با نوسانات ترافیکی و حالات انتقال حالت، توجه محققان به تحقیق در مورد پایداری رابطه محرک-پاسخ در مدل تعقیب خودرو جلب شده است. زمانی که زمان واکنش کمتر از انتظار باشد نوسانات کوچک به آرامی ناپدید می‌شوند و در غیر این صورت این نوسانات در زمان انتشار گسترده‌تر می‌شوند. بر اساس پاسخی که راننده به محرک‌ها در مدل تعقیب خودرو می‌دهد می‌توان رابطه شماره ۵ را تعریف نمود.

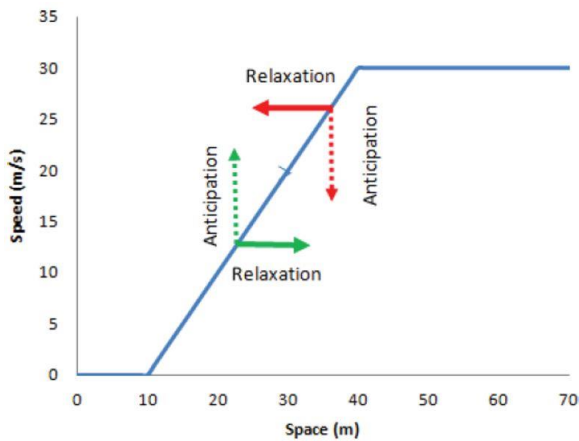
$$\text{Response} = F(\text{stimulus}) \quad (5)$$

پرخاشگری راننده می تواند باشد. در نظر گرفتن انتظار به تنهایی حلقه ای تشکیل نمی شود. همان طور که در شکل شماره ۹ مشخص است با  $\beta$  بزرگ تر باعث نزدیک شدن عدم تعادل به حالت تعادل می شود.

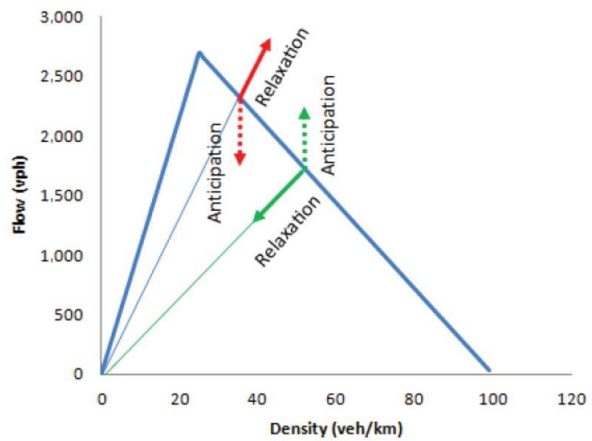


شکل ۷. تغییرات حالات ترافیکی در اثر انتظار

در جهت سرعت هدایت می کند و ترکیب آنها حلقه های هیستریزس را به وجود می آورد. این حالت در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است.



به صورت کلی انطباق نمودار را در جهت فاصله مکانی در حالت کاهش سرعت به سمت چپ و در حالت افزایش سرعت به سمت راست متمایل می کند و انتظار در حالت کاهش سرعت به سمت پایین در جهت سرعت و در افزایش سرعت به سمت بالا



شکل ۸. اثر ترکیب انطباق و انتظار

تشکیل نمی شود. زمانی که  $\alpha$  و  $\beta$  باهم فرق داشته باشد در سرعت بالا راننده سرعت را تغییر می دهد و انتظار حکم فرماست ولی در سرعت پایین سعی در کنترل فاصله مکانی دارد و انطباق

اگر  $k = \alpha = \beta$  فرض شود حلقه تکی رخ می دهد. زمانی که  $k < 1$  باشد حلقه مثبت با انطباق شکل می گیرد و زمانی که  $k > 1$  حلقه منفی در اثر انتظار رخ می دهد و زمانی که  $k = 1$  باشد حلقه

## بررسی ویژگی‌ها و عوامل مؤثر بر هیستریزس جریان ترافیک

ارتباط آن با میزان هیستریزس را مورد بررسی قرار دادند. در مدل TCI، سطح دشواری نتیجه برهمکنش‌های بین توانایی راننده و وقایع موجود در رانندگی است. توانایی راننده وابسته به مهارت و دانش به‌دست‌آمده از طریق تمرین و آموزش و همچنین مشخصات ذاتی انسان مانند تیزهوشی و دقت بینایی است. وقایع موجود در رانندگی شامل مواردی چون شرایط محیطی، ویژگی‌های وسیله نقلیه و سرعت و موقعیت خودرو نسبت به سایرین است. سیف الزمان در سال ۲۰۱۵ نشان داد که توانایی راننده را می‌توان متناسب با معکوس فاصله زمانی مطلوب راننده دانست و وقایع موجود را با سرعت و فاصله مکانی با خودرو جلویی بیان کرد و همچنین سطح دشواری را با نسبت وقایع موجود و توانایی راننده معرفی و معادله را ارائه کرد. در معادله شماره ۱۰،  $TD_n$  مربوط به راننده  $n$  در زمان  $t$ ،  $S_n$  فاصله بین سپر جلوی خودرو عقب با سپر عقب خودرو جلویی،  $V_n$  سرعت خودرو،  $\tilde{T}_n$  فاصله زمانی مطلوب راننده،  $\delta_n$  پارامتر خطر،  $\tau_n$  زمان واکنش و  $\gamma$  پارامتر حساسیت است.

$$TD_n = \left( \frac{V_n(t - \tau_n)\tilde{T}_n}{(1 - \delta_n)S_n(t - \tau_n)} \right)^\gamma \quad (10)$$

درک مثبت خطر باعث می‌شود که راننده شرایط را درک کند و منتج به افزایش فاصله زمانی می‌شود. در مقابل درک منفی خطر باعث می‌شود راننده در تخمین وقایع موجود اشتباه کند و منتج به رفتارهای حادثه‌ساز مانند سرعت زیاد و مانورهای خطرناک می‌شود.

جهت بررسی هیستریزس لازم است دوره شتاب در یک نوسان خط سیر به‌صورت کامل بررسی شود تا بازیابی سرعت ناشی از کاهش سرعت را بتوان مشاهده کرد. با استفاده از تست  $t$  مشخص شد که رفتار راننده در دوره رشد و توسعه‌یافته متفاوت است. با توجه به نظریه پایداری سطح دشواری فولر در سال ۲۰۰۵ رانندگان همواره جهت نگه‌داشتن سطح دشواری در سطح مطلوب از خود واکنش‌هایی نشان می‌دهند که در زمان کاهش سرعت قابل‌درک است. این امر در زمان رویارویی با نوسان توسعه‌یافته اتفاق نمی‌افتد چراکه راننده، خودروهای متوقف‌شده

حکم فرماست. در طول کاهش سرعت رانندگان پرخاشگر تمایل کمتری به کاهش سرعت دارند بنابراین پاسخ انطباق آنها بیشتر از انتظار است و بیشتر حلقه‌های مثبت تشکیل می‌شود. و؛ و همین ترتیب رانندگان محتاط حلقه‌های منفی تشکیل می‌دهند. در زمان افزایش سرعت رانندگان پرخاشگر تمایل به افزایش سرعت برای رسیدن به راننده جلویی دارند پس انتظار آنها بیشتر می‌شود و حلقه منفی تشکیل می‌دهند و بر همین اساس رانندگان محتاط حلقه‌های مثبت تشکیل می‌دهند.

### ۴-۳ اثر تقابل توانایی‌های راننده و شرایط موجود در

#### رانندگی و اثر آن بر هیستریزس

مدل‌های تئوری برای رفتار رانندگان مطرح شده است که در بین آنها مدل TCI<sup>۶</sup> که فولر در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ به دلیل بررسی مکانیسم تصمیم‌گیری<sup>۷</sup> بر اساس دو مفهوم توانایی راننده<sup>۸</sup> و وقایع موجود<sup>۹</sup> در رانندگی شناخته شده است. زمانی که وقایع موجود از ظرفیت ذهنی راننده کمتر باشد رانندگی تحت کنترل و عادی است. ولی وقتی وقایع بیش از ظرفیت ذهنی راننده باشد باعث بروز مشکل می‌شود. در مدل TCI راننده در طول زمان در حال تصمیم‌گیری و انطباق شرایط رانندگی با توجه به محدودیت‌هاست. سیف الزمان در سال ۲۰۱۵ با ترکیب فاکتورهای انسانی در مدل CF<sup>۱۰</sup> که از قوانین حرکت نیوتن استفاده می‌کند و با الهام از مدل TCI بر اثر رفتارهای انسانی در مدل TDCF<sup>۱۱</sup> پرداخت. تغییرات در سطح دشواری (TD)<sup>۱۱</sup> نشر و شکل‌گیری نوسان و هیستریزس را توصیف می‌کند. خطر درک شده توسط راننده، وی را وادار به اصلاح رفتار تا رسیدن سطح دشواری به سطح مناسب می‌کند. به‌طور مثال پس از یک کاهش سرعت ناگهانی راننده برای افزایش سرعت احتیاط بیشتری می‌کند چراکه می‌خواهد تجربه کاهش سرعت ناگهانی تکرار نشود و همین امر سبب عدم تقارن بین شتاب افزایشی و کاهشی شده و حلقه‌های هیستریزس را به وجود می‌آورد. سیف الزمان و همکاران در سال ۲۰۱۷ درک مکانیسم هیستریزس و نوسانات ترافیکی ناشی از تغییر در سطح دشواری آنها و بررسی فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و یکم/ شماره ۸۴/ بهار ۱۴۰۰

- نوع پنجم: در این نوع تغییری در ATD مشاهده نمی‌شود و مقدار هیستریزس تقریباً به صفر نزدیک است.

از هفت نوسان انتخاب شده در این تحقیق پنج عدد بیشتر نوع ۱ و دو عدد بیشتر شامل نوع ۲ بودند که در هر دو نوع سطح دشواری به دلایل مختلفی از جمله عدم تمرکز، واکنش دیر و پرخاشگری در مرحله کاهش سرعت افزایش می‌یابد. مسئله دیگر این است که تمام نوسانات از یک نقطه آغاز شده‌اند و مشخص شد که در زمان جمع‌آوری داده‌ها در میانه خیابان عملیات تعمیر در حال اجرا بوده است که یک عامل بیرونی برای ایجاد اختلال به وجود آورده بوده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

اگرچه وجود پدیده هیستریزس جزء ذاتی تردد ترافیکی است، اندازه و شدت آن قابل کنترل است. این کنترل از منظر استفاده بهره‌ور از زیرساخت‌های ترافیکی و نیز تأثیر بر میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها دارای اهمیت است. یافته‌های این مقاله موارد زیر را نشان می‌دهد:

۱- تأخیر در بازیابی سرعت و تغییرات در شتاب خودروها در نوسان باعث بروز حلقه‌های هیستریزس شده که پیامدهای آن می‌تواند افزایش زمان و هزینه‌های سفر، کاهش کارایی زیرساخت‌ها، افزایش مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها در ارتباط با حمل‌ونقل سبز و همچنین افزایش هزینه‌ها ناشی از استهلاک زیرساخت و خودرو باشد.

۲- هیستریزس را بر اساس میزان تفاوت بین منحنی افزایش و کاهش سرعت در یک چگالی مشخص می‌توان به چهار دسته قوی، ضعیف، ناچیز و منفی تقسیم‌بندی کرد.

۳- رفتار پرخاشگرایانه باعث خلق حلقه‌های منفی و رفتار محتاطانه باعث ایجاد حلقه‌های مثبت می‌شوند.

۴- در وضعیت انطباق، سرعت در زمان شتاب منفی بیشتر از سرعت تعادلی و در زمان شتاب مثبت کمتر از سرعت تعادلی است. این امر باعث تولید حلقه مثبت می‌شود. معکوس این حالت که حلقه منفی را شکل می‌دهد در اثر انتظار به وجود فصلنامه مهندسی ترافیک / سال بیست و یکم / شماره ۸۴ / بهار ۱۴۰۰

را در مقابل خود می‌بیند و آگاهی نسبت به شرایط دارد. به همین دلیل در این دوره اختلاف بین  $ATD^{13}$  در کاهش و افزایش سرعت تقریباً کم است. همچنین مشخص شد که مقدار هیستریزس در دوره رشد بیشتر از توسعه یافته است. به‌طورکلی سطح دشواری در زمان کاهش سرعت افزایش و در زمان افزایش سرعت کاهش می‌یابد. ولی سرعت و فاصله مکانی در زمان کاهش سرعت نسبت به فاز پایه کاهش و در زمان افزایش سرعت افزایش می‌یابد. در این تحقیق طبقه‌بندی بر اساس مشخصات سطح دشواری صورت گرفته است. هرچند نوساناتی در فازهای افزایش و کاهش سرعت دیده می‌شود ولی به‌طورکلی سطح دشواری در این مراحل نسبتاً پایدار است ولی در ناحیه انتقال فاز پایداری کاهش می‌یابد. راننده در این حالت سعی می‌کند سطح دشواری را به سطح جدید و یا اولیه بازگرداند. موقعیت نسبی ATD در این سه مرحله پنج نوع رفتار متفاوت ارائه می‌دهد.

- نوع اول: در این نوع ATD در کاهش سرعت افزایش و در افزایش سرعت کاهش می‌یابد و هیستریزس مثبت به وجود می‌آورد. مقدار و تعداد هیستریزس این نوع از بقیه بیشتر است.

- نوع دوم: این نوع مانند نوع اول است با این تفاوت که ATD در افزایش سرعت از حالت پایه کمتر می‌شود. این امر باعث کاهش مقدار هیستریزس نسبت به نوع اول می‌شود و میانگین آن تقریباً نصف است. این نوع بیشتر در حالت رشد مشاهده شده است.

- نوع سوم: در این حالت ATD در حال کاهش در سه فاز است. این نوع دومین نوع متداول هیستریزس است و در مرحله توسعه یافته شکل می‌گیرد. در این حالت راننده فرصت کافی برای پاسخ به عکس‌العمل راننده جلویی به نوسان را دارد و به آرامی به آن پاسخ می‌دهد و سطح ATD را کاهش می‌دهد.

- نوع چهارم: در این نوع به‌ندرت مشاهده شده است سطح ATD از کاهش سرعت به افزایش سرعت افزایش می‌یابد و مقدار هیستریزس منفی است.

- Transportation Research Part B, 1999, a mathematical theory of traffic hysteresis, Vol. 33.
- Yeo, H., Skabardonis, A., 2009. Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory. In: Lam, W., Wong, S.C., Lo, H. (Eds.), The 18<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, vol. 1.
- Transportation Research Part A, 2002, a multi-class traffic flow model – an extension of LWR model with heterogeneous drivers, Vol. 36.
- Laval, J.A., Leclercq, L., 2010. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 368 (1928), 4519–4541.
- 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.
- Transportation Research Part B, 2017, Understanding the mechanism of traffic hysteresis and traffic oscillations through the change in task difficulty level, Vol. 105.
- Foteini, P., Orfanou, Eleni I., Vlahogianni, Matthew G., Karlaftis, 2012, Identifying features of traffic hysteresis on freeways, Transportation Research Board 91st Annual Meeting.
- Transportation Research Part A, 2002, a multi-class traffic flow model – an extension of LWR model with heterogeneous drivers, Vol. 46.
- Transportation Research Part B, 2012, a simplified car-following theory: a lower order model, Vol. 36.
- Transportation Research Record, 2015, On Traffic Relaxation, Anticipation, and Hysteresis, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Fuller, R., 2002. Psychology and the highway engineer. In: Fuller, R., Sanots, J.A. (Eds.), Human factors for highway engineers. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, pp. 1-10.

می‌آید. به دلیل ارتباط هیستریزس با نوسانات ترافیکی و حالات انتقال وضعیت، توجه محققان به تحقیق در مورد پایداری رابطه محرک-پاسخ در مدل تعقیب خودرو جلب شده است.

۵- زمانی که توان پردازشی لازم برای مانور مناسب کمتر از ظرفیت ذهنی راننده باشد رانندگی تحت کنترل و عادی است. ولی وقتی وقایع بیش از ظرفیت ذهنی راننده باشد باعث بروز مشکل می‌شود. تقابل این دو ویژگی می‌تواند به شناخت عوامل مؤثر بر هیستریزس کمک کند.

## ۶. پی‌نوشت‌ها

1. Hysteresis
2. Congestion
3. Car-Following
4. Counter Clock-Wise
5. Neural Network
6. Task Capability Interface
7. Decision Making
8. Driver Capability
9. Task Demand
10. Car-Following
11. Task Difficulty Car-Following
12. Task Difficulty
13. Average Task Difficulty

## ۷. مراجع

- Transportation Research Part B, 2012, Microscopic traffic hysteresis in traffic oscillations: A behavioral perspective, Vol. 46.
- Transportation Research Part B, 2011, Hysteresis in traffic flow revisited: An improved measurement method, Vol. 45.
- Newell, G.F., 1965. Instability in dense highway traffic, a review. In: Almond, J. (Ed.), The 2nd International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory.
- Newell, G.F., 1962. Theories of instability in dense highway traffic. Journal of the Operations Research Society of Japan 5, 9–54.

- Accident Analysis & Prevention, 2005, towards a general theory of driver behaviour, Vol 37.
- Accident Analysis & Prevention, 2015a, Impact of mobile phone use on car-following behaviour of young drivers, Vol 82.
- Saifuzzaman, M., Haque, M.M., Zheng, Z., Washington, S., 2015a. Impact of mobile phone use on car-following behaviour of young drivers. Accident Analysis & Prevention 82, 10-19.