

شناسایی پدیده هیستریس مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری راننده (قبل و بعد از آشفته‌گی جریان ترافیک)

علی عبدی، استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، قزوین، ایران
ارسلان صالحی کلام، دانشجوی دکترا، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، ایران
محمود صفارزاده، استاد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
علی رضا امین راد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی شوشتر، شوشتر، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: salehikalam.arsalan@gmail.com

دریافت: 1395/07/12 – پذیرش: 1396/02/15

چکیده

شناسایی ترافیک حرکت - توقف در آزادراه‌ها که منجر به آشفته‌گی جریان ترافیک می‌شود تاکنون نه تنها به دلیل کمبود داده‌های عبوری وسایل نقلیه و ناکافی بودن سنسورهای جمع‌کننده داده‌ها مبهم می‌باشد بلکه همچنین درک ناپیوستگی به منظور اعتبارسنجی آشفته‌گی‌ها در مدل‌های جریان ترافیک وجود دارد که معمولاً نتیجه‌ای از روابط ریاضی نسبت به رفتار رانندگان می‌باشد. در این مقاله به منظور آنالیز ترافیک حرکت - توقف مدل تعقیب خودرویی مبتنی بر داده‌های عبوری تجربی NGSIM ارائه می‌گردد که نه تنها قابلیت ایجاد نمودن انتشار واقعی و تشکیل بالقوه امواج حرکت - توقف را در ازدحام ترافیکی دارد، بلکه همچنین مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری، می‌توان پدیده هیستریسیس ترافیکی را آنالیز نمود که در آشفته‌گی ترافیکی از دیدگاه رفتاری راننده پدیدار می‌گردد. آنالیز آماری پارامترهای مدل نامتقارن رفتاری آشکار می‌نماید که همبستگی قابل توجهی بین رفتار راننده قبل، بعد و در زمان آشفته‌گی وجود دارد که در صورت آنالیز آشفته‌گی در سطح جزئی‌نگر، این همبستگی باید در نظر گرفته شود و همچنین نتایج آنالیز پدیده هیستریسیس مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری نشان می‌دهد که پیدایش و نوع الگوی پدیده هیستریسیس ارتباط نزدیکی با رفتار راننده در موقعیت حرکت راننده در آشفته‌گی ترافیکی دارد به عبارت دیگر، در زمانی که راننده با آشفته‌گی‌های ترافیکی مواجه می‌شوند و در زمانی که موج کاهش شتاب آغاز می‌شود، پدیده هیستریسیس ترافیکی به گروه‌بندی و الگوهای رفتاری راننده و سناریو پاسخ‌های رفتاری راننده در دوره تشکیل آشفته‌گی ترافیکی مرتبط می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آشفته‌گی جریان ترافیک، پدیده هیستریسیس، راننده پرخاشگر، راننده محتاط، راننده متعادل

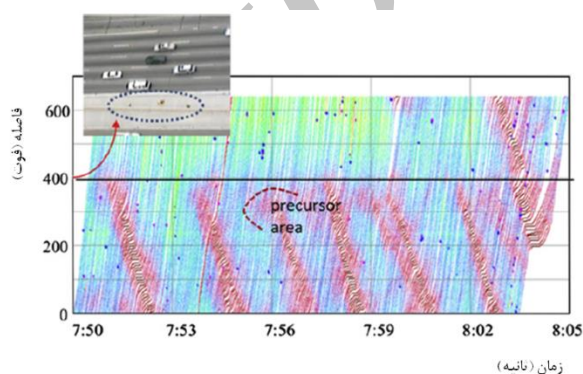
1- مقدمه

ترافیک حرکت - توقف تاکنون محدود می‌باشد. آشفته‌گی جریان ترافیک از دو مؤلفه، شکل‌گیری و انتشار تشکیل می‌گردد که مانورهای تغییر خط [Laval 2006, Ahn and Cassidy, 2007, Mauch and Cassidy, 2002, Zheng et al., 2011a, Zheng et al., 2011b, Laval Koshi et al., 2005]. یا هر نوعی از گلوگاه‌های ترافیک [Laval, 2006, al., 1992] منجر به شکل‌گیری ترافیک حرکت - توقف می‌گردد. ترافیک حرکت - توقف

ترافیک حرکت - توقف یا آشفته‌گی ترافیک به سبب اثرات منفی مانند: افزایش مصرف سوخت، اثرات زیست‌محیطی، خطرات ایمنی مورد توجه محققان بسیار زیادی قرار گرفته است [Bilbao-Ubillos, 2008, Zheng et al., 2010] اما تاکنون به دلیل فقدان داده‌های عبوری و نوسانی بودن داده‌هایی جمع‌آوری‌شده توسط سنسورها، درک مان از مکانیزم شکل‌گیری و انتشار

پویا جامعی از رفتار راننده وسیله نقلیه پیرو در مقابل آشفستگی وجود ندارد [Zheng et al., 2011]. مقایسه رفتار حرکت - توقف زنجیره وسایل نقلیه در آزادراهها بر اساس داده‌های برداشت شده در هنگام خروج از آشفستگی ترافیک با رفتار زنجیره وسایل نقلیه در حال نزدیک شدن به آشفستگی ترافیک که بیانگر تأخیر در بازیابی سرعت در زمان خروج از آشفستگی ترافیک می‌باشد، سبب تشکیل پدیده هیسترسیس در جریان ترافیک می‌گردد. Treiterer, Mayer برای نخستین بار با کمک عکس‌برداری هوایی رفتار زنجیره‌وار وسایل نقلیه را در ورود و خروج از آشفستگی ترافیکی مطالعه و پی بردند که مقایسه نمودارهای چگالی و سرعت و نرخ جریان در زنجیره وسایل نقلیه در آشفستگی منجر به تشکیل حلقه می‌گردد [Treiterer and Myers, 1974]. نیویل مبتنی بر تئوری نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب، تأخیر در فاز شتاب‌گیری وسایل نقلیه (پیرو و پیشرو) را معرف پدیده هیسترسیس ارائه نمود [Newell, 1962]. Zhang. تئوری نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب را فرموله و جریان ترافیک را به سه فاز آسایش در فاز افزایش سرعت، ناحیه پیش‌بینی‌آدر فاز کاهش سرعت، ناحیه تعادلی بین پیش‌بینی و آسایش^۳ بین دو حالت قبل تقسیم‌بندی نمود که انتقال بین سرعت - چگالی در فازهای مختلف منجر به شناسایی حلقه‌های هیسترسیس گردید [Zhang, 1999]. Zhang با کاربرد تئوری جدید برای مدل وسیله نقلیه دنباله‌رو، مقدار جدیدی برای فاصله زمانی^۴ به صورت تابعی از فاصله مکانی^۵ و فاز ترافیکی که شامل افزایش و کاهش شتاب و شرایط کرانه‌ای^۶ می‌شود، معرفی نمود [Zhang and Kim, 2005]. مدل‌سازی عددی این تئوری اثبات نمود که این مدل، هیسترسیس ترافیکی را همراه با افت ظرفیت در مدت تبدیل جریان آزاد به جریان ازدحام به وجود می‌آورد. Yeo و Skabardonis یک تئوری نامتقارن جزئی‌نگر مبتنی بر رابطه سرعت و سرفاصله مکانی ارائه نمودند که در آن منحنی‌های افزایش و کاهش شتاب را با متصل نمودن نقاط

برای نخستین بار توسط Edie در تونل Lincoln شناسایی گردید اما دلایل و مکانیزم شکل‌گیری و انتشار ترافیک حرکت - توقف مبهم می‌باشد [Edie, 1961]. مطابق شکل (1) تحقیقات نشان می‌دهد که ترافیک حرکت - توقف حتی بدون مانورهای تغییر خط، به سبب افت سرعت‌های ناگهانی در زنجیره وسایل نقلیه تشکیل می‌گردد و موج به سمت جریان بالادست منتشر می‌گردد اما دلایل رشد دامنه آشفستگی و دوره‌های منظم 2 تا 15 دقیقه‌ای آشفستگی تاکنون مبهم می‌باشد [Laval et al., 2009, Ahn et al., 2004, Ahn, 2005].



شکل 1. نمودار آشفستگی مبتنی بر داده‌های عبوری NGSIM [Chen 2012],

تحقیقات مبتنی بر آنالیز پایداری وسیله نقلیه دنباله‌رو نشان می‌دهد که آشفستگی‌های کوچک می‌توانند رشد کنند و زمانی که پارامترهای مدل به دقت انتخاب گردند آشفستگی‌ها به طور کامل تکمیل می‌گردند [Wilson, 2011, Wilson, 2005]. Treiber, Kesting به طور تحلیلی ویژگی‌های آشفستگی ترافیکی (طول موج و نرخ رشد) را محاسبه و ارائه نمودن که ناپایداری منجر به آشفستگی جریان ترافیک می‌گردد و پارامترهای مدل را مؤثر در میزان ناپایداری معرفی نمودند [Treiber, 2011, Kesting]. Zheng با استفاده نمودن از روش انتقال موج، مسیر داده‌های عبوری را تحلیل و ویژگی‌های آشفستگی ترافیکی، دامنه و مدت آشفستگی، را مطالعه نمود و اگرچه رفتار راننده را در مدت آشفستگی را با مقایسه نمودن رفتار راننده قبل و بعد از آشفستگی آنالیز نمود اما توصیف

تحلیل دقیقی بین تئوری موج کینماتیکی LWR و نمودار مثلثی نرخ جریان - چگالی Daganzo می‌باشد.

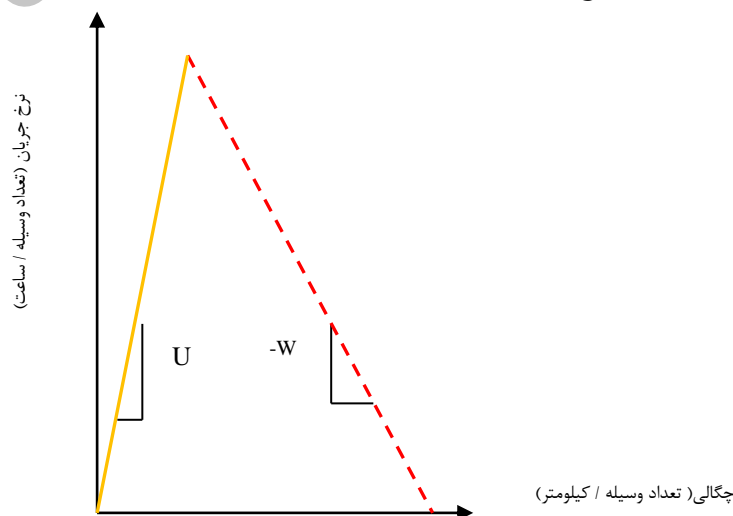
مبنتی بر تئوری نیویل اگر وسیله نقلیه پیشرو (n-1) با سرعت ثابت v حرکت کند، وسیله نقلیه پیرو (n) باید با سرعت ثابت v سفر کند. سرفاصله مکانی بین دو وسیله نقلیه پیشرو و پیرو در زمان t می‌تواند تغییر کند اما اگر بزرگراه همگن^۱ و تمام وسایل نقلیه یک نوع در نظر گرفته شوند، سرفاصله مکانی تقریباً باید در مقدار S_n ثابت بماند اما می‌تواند برای وسایل نقلیه مختلف تغییر کند. مطابق شکل (3) در تئوری مدل نیویل 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. مطابق شکل (3) 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^i ، تغییر فاز حرکت می‌دهند که در این مدل مقادیر τ^i, δ^i مقادیری ثابت برای هر وسیله مستقل از سرعت در نظر گرفته می‌شود و مطابق شکل (4) منجر به رابطه خطی بین سرعت و سرفاصله مکانی $s^i = \delta^i + \tau^i v$ می‌شود. پارامترهای τ ، δ که مطابق رابطه‌های (1 و 2) تعیین می‌گردند که پارامترهای W, K به ترتیب سرعت موج شوک و چگالی اشباع می‌باشند و برای هر راننده در طول مسیر حرکت ثابت می‌ماند اما برای راننده‌های متفاوت تغییر می‌کنند [Chen et al., 2012].

آغازین افزایش و کاهش شتاب به دست آوردند که پنج وضعیت ترافیکی، جریان آزاد، افزایش شتاب، کاهش شتاب، کرانه‌ای و پایا^۲ را معرفی و گسستگی بین منحنی‌های افزایش و کاهش شتاب را علت تشکیل حلقه‌های هیسترسیس بیان نمودند [Yeo and Skabardonis, 2009]. Laval, Ahn دامنه پدیده هیسترسیس را با تعریف نمودن ناحیه‌ای در شرایط تقریباً پایدار از داده‌های عبوری و با استفاده نمودن تعاریف عمومی Edie از جریان ترافیک، چگالی و سرعت را مبتنی بر مقایسه بین سرفاصله مکانی مشاهده‌شده و معادل اندازه‌گیری نمودند [Laval, 2010, Ahn and Vadlamani, 2011, Edie, 1961]. این مقاله به منظور توصیف نمودن رفتار رانندگی تحت شرایط ترافیک غیر ازدحام مبتنی بر داده‌های عبوری NGSIM، مدل رفتاری در آشفتگی ترافیک ارائه و سپس مبتنی بر این مدل رفتاری نامتقارن، پدیده هیسترسیس ترافیکی در سطح جزئی‌نگر از جنبه رفتاری آنالیز می‌گردد.

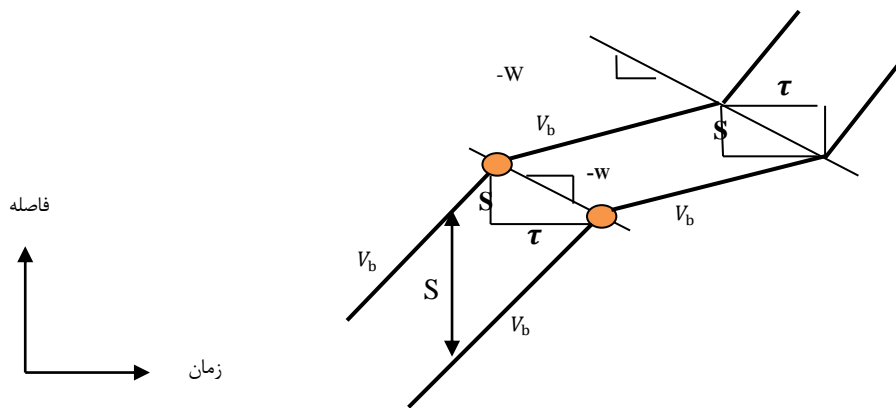
2- روش تحقیق

1-2 مدل تعقیب خودرو نیویل

مطابق شکل (2)، مدل تعقیب خودرو نیویل در نمودار نرخ جریان - چگالی به وسیله سه پارامتر سرعت جریان آزاد u ، سرعت موج، w ، چگالی اشباع، k ، معرفی می‌گردد که بیانگر



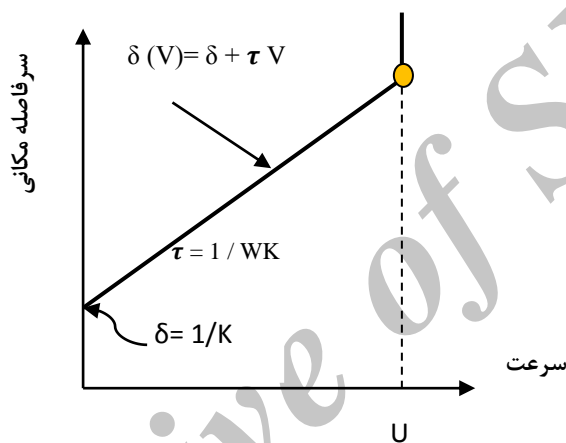
شکل 2. پارامترهای مدل تعقیب خودرو نیویل در نمودار نرخ جریان - چگالی [Newell 2002]



شکل 3. پارامترهای مدل نیویل در نمودار فاصله - زمان [Chen 2012]

$$\tau = \frac{1}{wk}, \delta = \frac{1}{k}$$

رابطه (1 و 2)



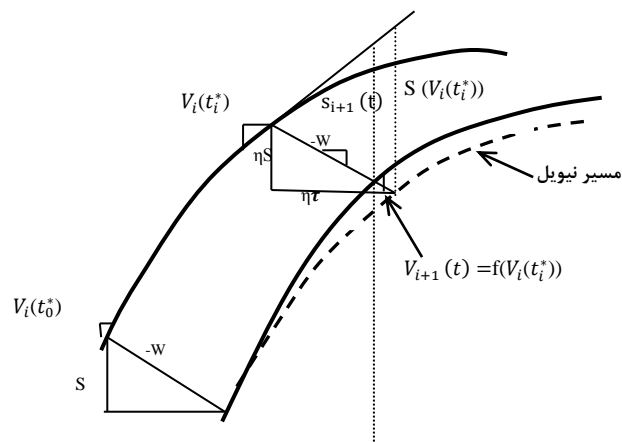
شکل 4. رابطه سرعت و سرفاصله مکانی مبتنی بر مدل نیویل [Newell 2002]

معادل $\delta(v_i(t_i^*))$ می‌باشد. t_i^* زمانی است که موج از وسیله پیشرو انتشار می‌یابد و t زمانی است که وسیله پیرو موج آشفته‌گی را درک می‌نماید. مبتنی بر این مدل تعقیب خودرو، زمانی که وسیله پیرو در تعادل است مقدار η_{i+1}^t برابر یک و مسیر راننده پیرو مطابق با مسیر نیویل می‌باشد، در غیر این صورت η_{i+1}^t از مقدار یک منحرف می‌شود که بیانگر رفتار آشفته‌گی یا غیرتعادلی راننده پیرو می‌باشد. مطابق شکل (6) وسیله نقلیه پیرو سه الگوی رفتاری مقعر، محدب و ثابت را نشان می‌دهد که به ترتیب بیانگر راننده محتاط، پرخاشگر و متعادل می‌باشند [Laval and Leclercq, 2010].

2-2- مدل رفتاری تعقیب خودرو $L.L^9$

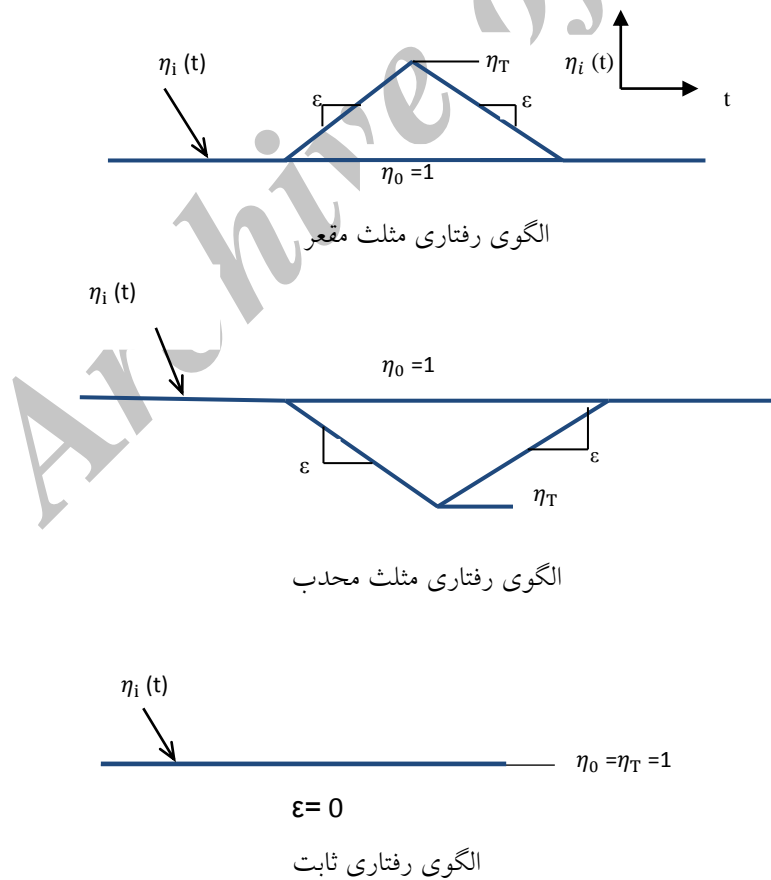
Laval, Leclercq (2010) با مدل‌سازی نمودن ترافیک حرکت - توقف پی بردند که رفتار راننده، پرخاشگر و محتاط، سبب شکل و انتشار آشفته‌گی‌های ترافیکی می‌گردد که مطابق شکل (5)، داده‌های عبوری جریان ترافیک راننده پیرو با پارامترهای δ ، τ با راننده پیشرو خود قبل از آشفته‌گی مطابقت خوبی دارند [Laval and Leclercq, 2010].

در آشفته‌گی جریان ترافیک که وسیله نقلیه پیرو از مسیر Newell منحرف می‌شود، انحراف از مسیر مدل نیویل وسیله نقلیه پیرو، به وسیله پارامتر η_{i+1}^t تعیین می‌شود که مطابق رابطه (3) نسبت سرفاصله مکانی واقعی δ_{i+1}^t به سرفاصله مکانی



شکل 5. مدل تعقیب خودرو [Laval , Leclercq 2010]

$$\eta_{i+1}^t = (\delta_{i+1}^t) / \delta(v_i(t_i^*)) \quad (3)$$



شکل 6. الگوهای رفتاری راننده پیرو مبتنی بر مدل تعقیب خودرو [Laval , Leclercq 2010]

2-3- مدل نامتقارن رفتاری راننده قبل و بعد از

آشفتگی

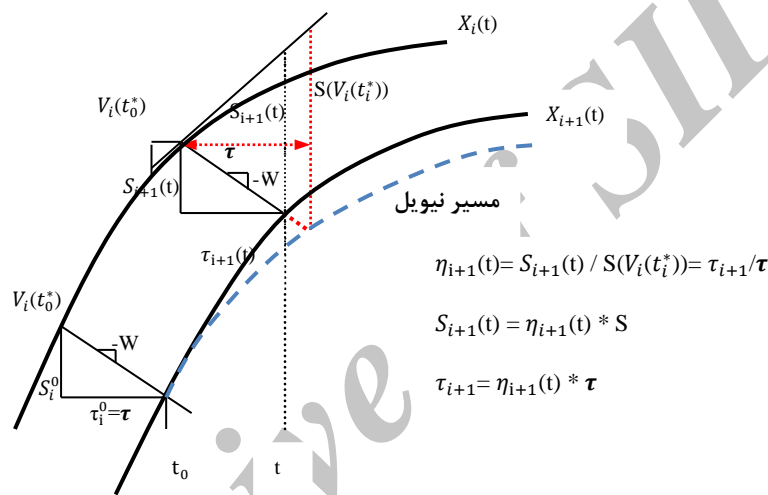
با محاسبه نمودن مقدار متغیر $\eta_i(t)$ مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری الگوهای پاسخی متفاوتی تشکیل می‌گردد که مدل L.L حالت خاصی از الگوهای پاسخی در مدل می‌باشد.

1-3-2: اندازه‌گیری $\eta_i(t)$

مطابق شکل (7) مقدار $\eta_i(t)$ از فرمول 5، محاسبه می‌گردد که از نسبت $\tau_i(t)$ ، زمان سفر موج واقعی و τ ، مقدار متوسط $\tau_i(t)$ قبل از آشفتگی همه نمونه‌های مسیر می‌باشد که می‌توان از رابطه (4)، محاسبه نمود.

(4)

$$\tau = \frac{1}{wk}$$



شکل 7. اندازه‌گیری $\eta_i(t)$ مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری [chen, 2012]

متوسط $\eta_i(t)$ در محدوده $\eta_i^0, \eta_i^1, \eta_i^T$ و ε_i^1 : شیب متوسط (t)

η_i^1, η_i^T در محدوده

1- قبل از تعادل $\eta_i^0 = \eta_i(t)$

2- در زمان آشفتگی

$$\eta_i(t) = \eta_i^0 + \varepsilon_i^0 (t-t^0), \quad (6)$$

$$\eta_i(t) \leq \eta_i^T$$

$$\eta_i(t) = \eta_i^T - \varepsilon_i^1 (t-t^T), \quad \eta_i^1 \quad (7)$$

$$\leq \eta_i(t) \leq \eta_i^T$$

3- بعد از آشفتگی

$$\eta_i(t) = \eta_i^1$$

t^0 : لحظه شروع آشفتگی، t^T : لحظه‌ای که $\eta_i(t)$ بیشترین

انحراف را از تعادل دارد.

مدل رفتار تعقیب خودرو در جریان ترافیک ازدحام را می‌توان به شرح زیر توصیف نمود:

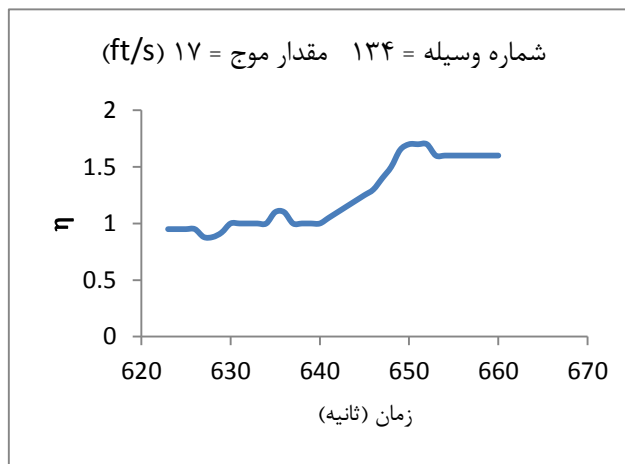
1- راننده وارد مد غیر تعادلی جریان ترافیک می‌شود زمانی که آشفتگی جریان ترافیک آغاز شود.

2- الگوی رفتاری راننده در آشفتگی به چهار الگوی مثلث محدب، $\eta_i^T > \eta_i^0, \eta_i^1$ ، الگوی مثلث مقعر، $\eta_i^T < \eta_i^0, \eta_i^1$ و الگوی ثابت^{۱۳}، $\eta_i^T = \eta_i^0 = \eta_i^1$ و مطابق شکل (8) بدون کاهش^{۱۴} تقسیم می‌گردد.

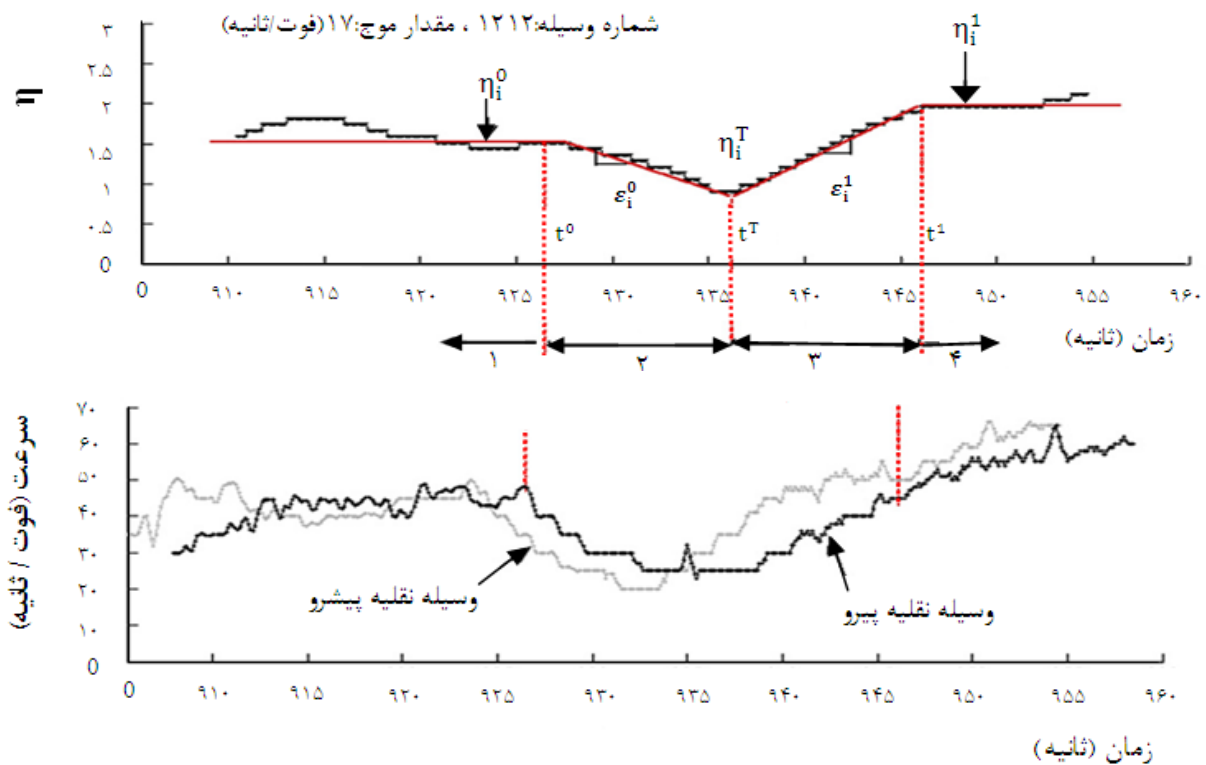
3- قبل و بعد آشفتگی، راننده پیرو در تعادل می‌باشد.

مطابق شکل (9) پارامترها و پاسخ الگوی رفتاری مقعر را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

(η_i^0, η_i^1) : مقدار پایدار $\eta_i(t)$ قبل (بعد) از آشفتگی جریان ترافیک، η_i^T : انحراف ماکزیمم $\eta_i(t)$ از η_i^0 (ε_i^1) ε_i^0 : شیب



شکل 8. الگوی رفتاری بدون کاهش مبتنی بر داده‌های عبوری NGSIM



شکل 9. نمونه‌ای از پاسخ الگوی رفتاری مقرر [Chen, 2012]

3- داده‌های عبوری

در این مقاله مطابق شکل (10)، از داده‌های خط یک مسیر آزادراه US101 استفاده می‌شود که به وسیله NGSIM از ساعت 7:50 تا 8:35 بعد از ظهر جمع‌آوری شده است. در خط عبوری شماره یک، آشفتگی ترافیک در هر دو یا سه دقیقه ظاهر می‌شود و سرعت مینیمم وسایل نقلیه به صفر یا نزدیک صفر می‌رسد که نشان‌دهنده توسعه فاز آشفتگی به بالادست می‌باشد.

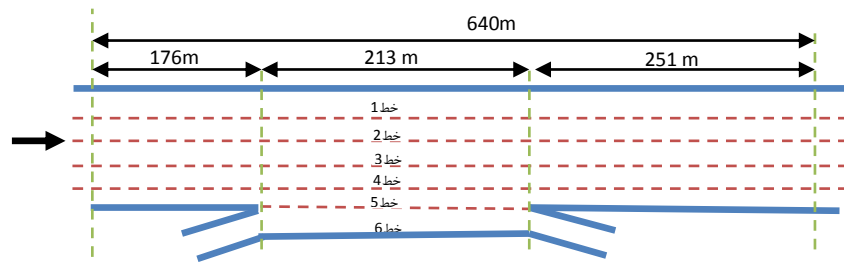
4- نتیجه‌گیری

4-1: آنالیز آماری مدل نامتقارن رفتاری:

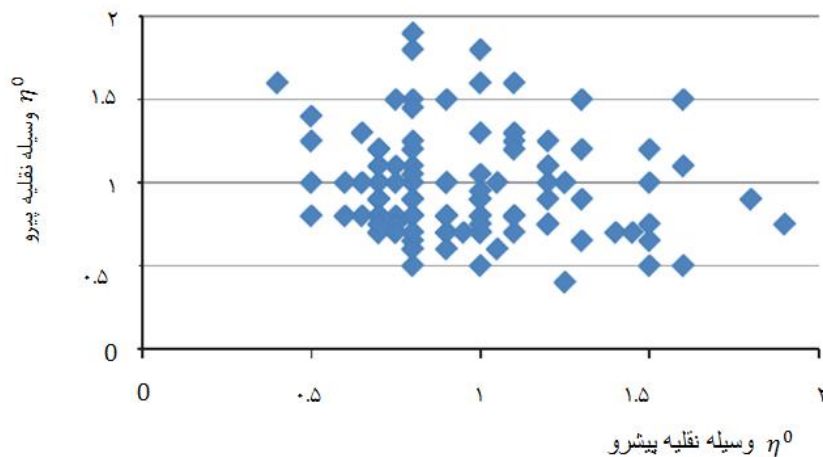
هدف از آنالیز داده‌های عبوری، مطالعه نمودن ویژگی‌های رفتاری رانندگان، η_i^t و ارتباط بین پارامترهای مدل می‌باشد که می‌تواند به ساده‌سازی نمودن بیشتر مدل کمک نماید. مطابق شکل (11)، نتایج آماری 123 جفت داده عبوری با صرف‌نظر از داده‌های تغییر خط دهنده نشان می‌دهد که هیچ ارتباط خاصی

همچنین در مورد سایر پارامترها نیز نتیجه‌ای مشابه حاصل گردید [chen et al, 2012].

بین رفتار راننده پیرو و پیشرو قبل از آشفستگی، η_i^0 وجود ندارد که بیانگر مستقل بودن رفتار راننده از سایر رانندگان می‌باشد و



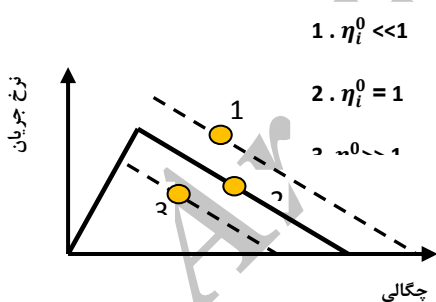
شکل 10. بزرگراه US-101



شکل 11. ارتباط بین وسیله نقلیه پیشرو و پیرو

4-2- مقایسه مدل L.L و مدل نامتقارن رفتاری

مطابق شکل (12) رفتار راننده قبل، بعد و در حین آشفستگی را می‌توان به وسیله سه پارامتر η_i^0 ، η_i^1 و $\eta_i(t)$ مشخص نمود که مقادیر مختلف η_i^0 با شاخه‌های ازدحام شده متفاوت در نمودار نرخ جریان - چگالی مطابقت دارد. مبتنی بر مدل KWT، اگر $\eta_i^0 \ll 1$ باشد راننده تمایل به حفظ سرفاصله مکانی کوچک‌تر نسبت به مقدار تعادل دارد که بیانگر رفتار راننده پرخاشگر، OA، اگر $\eta_i^0 \gg 1$ باشد راننده تمایل به حفظ سرفاصله مکانی بزرگ‌تر نسبت به مقدار تعادل دارد که بیانگر رفتار راننده محتاط، OT، و اگر $\eta_i^0 = 1$ باشد راننده تمایل به حفظ سرفاصله مکانی برابر نسبت به مقدار تعادل دارد که بیانگر رفتار راننده متعادل، ON می‌باشد همچنین به‌طور مشابه مقدار η_i^1 بعد از آشفستگی جریان ترافیک را می‌توان به‌صورت فوق نسبت به رفتار راننده معرفی نمود [chen et al., 2012].



شکل 12. مقایسه مدل L.L و مدل نامتقارن رفتاری [Chen 2012]

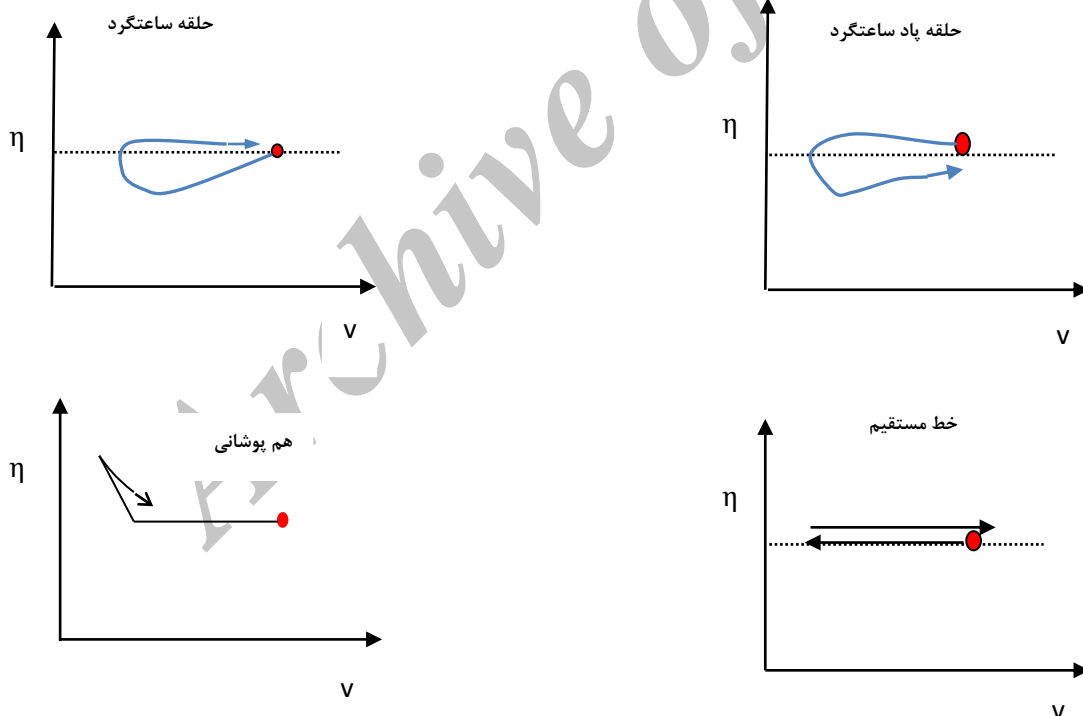
مطابق جدول 1، تفاوت مدل L.L و مدل رفتار نامتقارنی را می‌توان مشاهده نمود، در مقایسه مدل L.L مبتنی بر این فرض می‌باشد که پاسخ رانندگان به آشفستگی‌های جریان ترافیک به‌صورت متقارن، $\eta_i^1 = \eta_i^0$ ، $\varepsilon_i^1 = \varepsilon_i^0$ و همچنین گروه‌بندی رانندگان از طریق الگوی پاسخی رانندگان تعیین می‌گردد به‌عبارت‌دیگر، مدل L.L فقط یک مورد خاص از مدل رفتار نامتقارنی می‌باشد [chen et al, 2012].

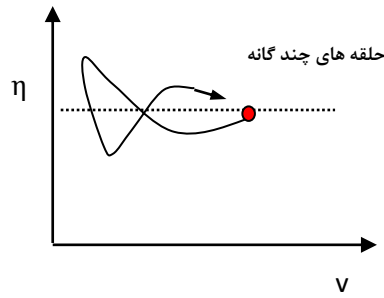
جدول 1. اختلاف بین مدل L.L و مدل نامتقارن رفتاری [Chen 2012]

مدل رفتار نامتقارنی	مدل L.L	وسایل نقلیه
هر وسیله مجموعه پارامتر خاص خودش را دارد $[\eta_i^0, \eta_i^1, \eta_i^T, \varepsilon_i^0, \varepsilon_i^1]$	تقسیم بندی مجموعه پارامترها به صورت برابر	
$\eta_i^0 < \eta_i^1$ $\varepsilon_i^0 < \varepsilon_i^1$	$\eta_i^0 = \eta_i^1 = 1$ $\varepsilon_i^0 = \varepsilon_i^1 = \varepsilon$	$\eta_i^0, \eta_i^1, \eta_i^T, \varepsilon_i^0, \varepsilon_i^1$
راننده پرخاشگر $\eta_i^0 \ll 1$ راننده محتاط $\eta_i^0 \gg 1$ راننده متعادل $\eta_i^0 \sim 1$	$\eta_i^0 = 1$	گروه بندی راننده در تعادل
مثلث مقعر (راننده پرخاشگر، محتاط، نیویل) مثلث محدب (راننده پرخاشگر، محتاط، نیویل) ثابت (راننده پرخاشگر، محتاط، نیویل)	مثلث مقعر: راننده پرخاشگر مثلث محدب: راننده محتاط ثابت: راننده نیویل	الگوهای عکس العمل در آشفتگی

نمودار η و V که هم جهت با نمودار سرعت - سرفاصله می باشد، مطابق شکل (13) می توان 5 حالت پدیده هیسترسیس ترافیکی، حلقه ساعت گرد، حلقه پادساعت گرد، هم پوشانی¹⁵، خط مستقیم¹⁶ و چندگانه¹⁷ را شناسایی نمود [chen, 2012].

3-4- پدیده هیسترسیس ترافیکی مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری توقف کاهش سرعت مینیمم در فاز کاهش سرعت منجر به پایان یافتن دوره رشد ترافیکی و شروع دوره توسعه آشفتگی ترافیکی مبتنی بر ثابت ماندن مینیمم سرعت می شود. مطابق با





شکل 13. آنالیز پدیده هیسترسیس ترافیکی مبتنی بر مدل نامتقارن رفتاری [Chen, 2012]

مینم بیانگر توسعه یافتن آشفتگی می باشد [chen et al., 2012].

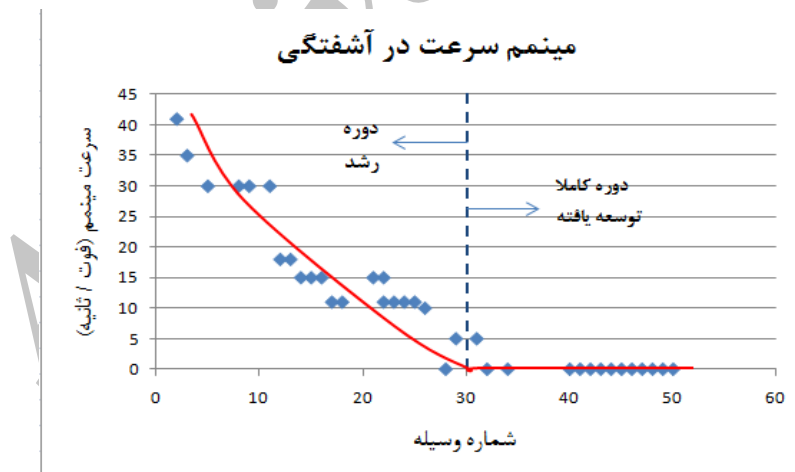
4-5- آنالیز آماری پدیده هیسترسیس

نتایج آماری مبتنی بر سه پارامتر کلیدی، الگوی پدیده هیسترسیس، گروه بندی راننده، الگوی رفتاری راننده در آشفتگی ترافیکی برای آنالیز 109 و 126 زوج وسیله نقلیه در دوره رشد و توسعه آشفتگی ارائه می گردد [chen et al., 2012]:

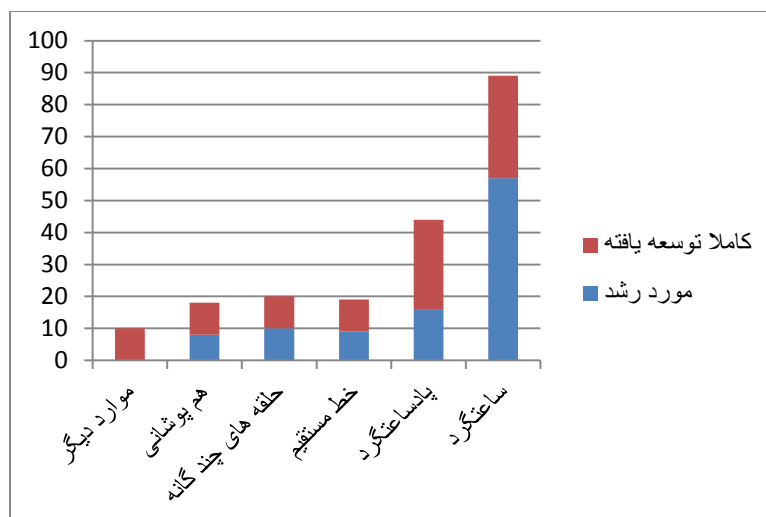
1- مطابق شکل در حدود 60-75 درصد رانندگان در دو دوره آشفتگی حلقه های ساعت گرد و پادساعت گرد را تشکیل می دهند.

4-4- تقسیم بندی آشفتگی جریان ترافیک

به منظور تغییر بالقوه رفتار راننده و هیسترسیس ترافیکی، آشفتگی جریان ترافیک را در مرحله تشکیل شدن می توان به دو دوره رشد^{۱۸} و کاملاً توسعه یافته^{۱۹} تقسیم بندی نمود. مطابق شکل (14) در دوره رشد، زمانی که آشفتگی به جریان بالادست منتشر می شود سرعت مینم رانندگان در مدت سیکل آشفتگی کاهش و در دوره کاملاً توسعه یافته، کاهش سرعت مینم رانندگان در مدت سیکل آشفتگی متوقف می شود. به عبارت دیگر، زمانی که وسایل نقلیه از یک آشفتگی عبور می کنند، کاهش یافتن سرعت مینم وسیله های نقلیه عبوری بیانگر رشد نمودن آشفتگی و ثابت یا افزایش یافتن سرعت



شکل 14. مینم سرعت وسایل در آشفتگی جریان ترافیک [Chen 2012]



شکل 15. مقایسه الگوهای هیستریسیس [Chen, 2012]

رفتاری را با انواع مختلف حلقه‌های هیستریسیس بررسی نمود. نقطه قرمز رنگ در شکل، بیان‌گر نقطه شروع آشفته‌گی و جهت فلش بیان‌گر جهت تغییرات $\eta(t)$ می‌باشند. مطابق شکل (1-17) در وضعیت 1، اگر تغییرات $\eta(t)$ در فاز کاهش شتاب آغاز و پایان یابد منجر به تشکیل حلقه پادساعت‌گرد در الگوی پاسخ رفتاری مقعر و اگر در فاز افزایش شتاب آغاز و پایان یابد مطابق شکل (1-17) وضعیت 2، منجر به تشکیل حلقه ساعت‌گرد در الگوی رفتاری مقعر می‌شود. اگر تغییرات $\eta(t)$ در سیکل آشفته‌گی تقسیم شود مطابق شکل (1-17) در وضعیت 3، حلقه‌های چندگانه در الگوی رفتاری مقعر تشکیل می‌گردند. اگر تغییرات در $\eta(t)$ در فاز کاهش و افزایش شتاب به‌طور مساوی تقسیم شود مطابق شکل (3-17).

منجر به تشکیل حلقه هیستریسیس هم‌پوشانی با الگوی رفتاری مقعر و محدب می‌گردد. با استفاده نمودن از آنالیز مشابه برای الگوی رفتاری محدب می‌توان حلقه‌های هیستریسیس را مطابق شکل‌های (2-17) ارائه نمود و اگر تغییرات $\eta(t)$ در فاز افزایش و کاهش شتاب کاهش نیابد، مطابق شکل (4-17) منجر به تشکیل هیستریسیس بدون کاهش می‌گردد که به دلیل تکمیل نشدن حلقه به‌طور کامل، می‌توان این وضعیت را به‌عنوان حلقه ساعت‌گرد در نظر گرفت [chen et al., 2012].

جدول (2) الگوی پدیده هیستریسیس ترافیکی در دو دوره آشفته‌گی را نشان می‌دهد که احتمال تشکیل حلقه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد در دو دوره تشکیل آشفته‌گی چگونه توزیع می‌شوند. نتایج الگوهای هیستریسیس ترافیکی مطابق جدول یک در دو دوره آشفته‌گی نشان می‌دهد که احتمال تشکیل حلقه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد در دوره رشد آشفته‌گی زیادتر می‌باشد به‌طوری‌که احتمال تشکیل احتمال تشکیل حلقه‌های ساعت‌گرد تقریباً 4 برابر حلقه‌های پادساعت‌گرد می‌باشد، اما در دوره توسعه احتمال تشکیل دو حلقه ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد کمتر می‌شود.

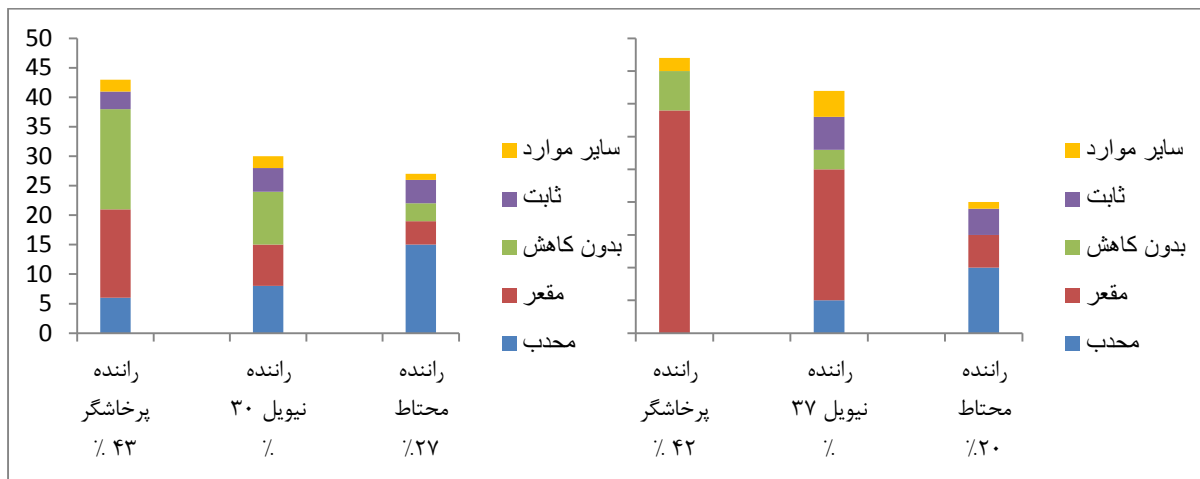
2- مطابق شکل (16) در هر دوره آشفته‌گی گروه رفتاری رانندگان، الگوی متفاوت پاسخ رانندگان در آشفته‌گی مشخص می‌نماید که راننده پرخاشگر در دوره رشد تمایل به الگوهای رفتاری مقعر و بدون کاهش و در دوره توسعه یافته اساساً با الگوی رفتاری مقعر منطبق است. راننده متعادل در دوره رشد با هر چهار الگوی رفتاری، در دوره توسعه با الگوی مقعر و راننده محتاط در هر دو دوره آشفته‌گی با الگوی رفتاری محدب منطبق می‌باشد [chen et al., 2012].

4-6- ارتباط پدیده هیستریسیس و الگوی پاسخ در آشفته‌گی

مطابق شکل (17)، از نمودار $\eta-v$ می‌توان الگوی مختلف

جدول 2. توزیع الگوی هیستریسیس [Chen, 2012]

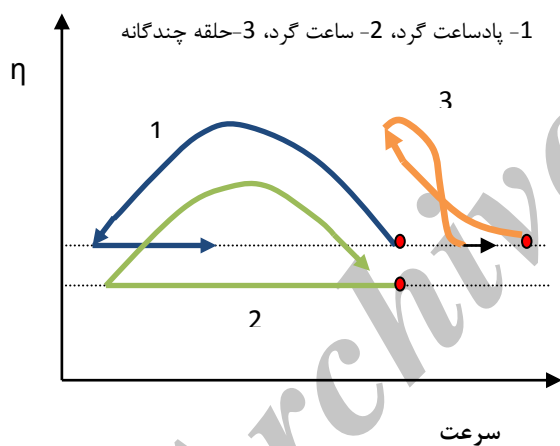
	سایر موارد	حلقه چندگانه	هم پوشانی	حلقه ساعت گرد	خط مستقیم	حلقه پادساعت گرد
مورد رشد	2	7	11	64	12	17
رد کاملاً توسعه یافته	13	15	12	45	13	38



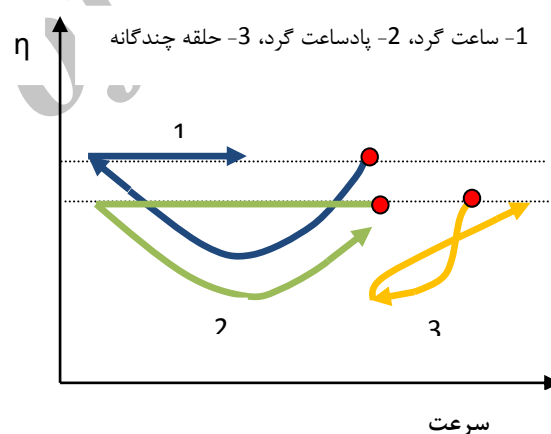
شکل 16-الف- الگوی رشد

شکل 16-ب- الگوی کاملاً توسعه یافته

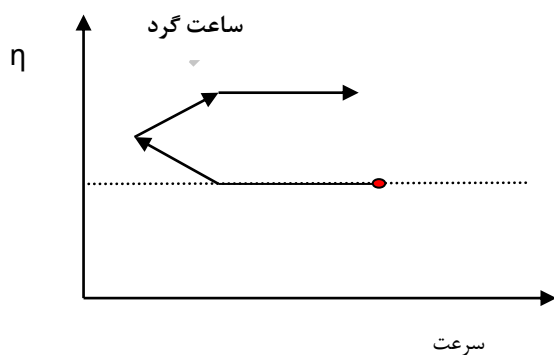
شکل 16. تحلیل پدیده هیستریسیس ترافیکی مبتنی بر گروه بندی راننده [Chen, 2012]



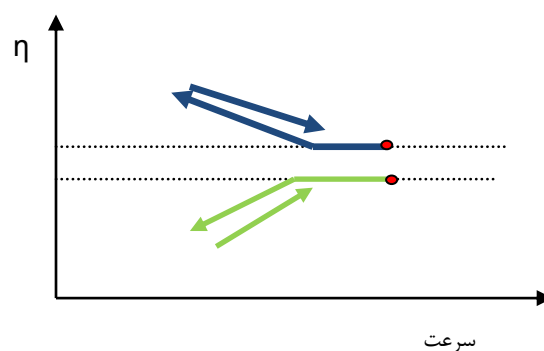
شکل 17-1- الگو رفتاری مقعر



شکل 17-2- الگوی رفتاری محدب



شکل 17-4- الگوی بدون کاهش



شکل 17-3- الگوی هم پوشانی

شکل 17. پدیده هیستریسیس مبتنی بر الگوی نامتقارن رفتاری [Chen, 2012]

کاهش شتاب آغاز و در پایان فاز افزایش شتاب متوقف می‌گردد.

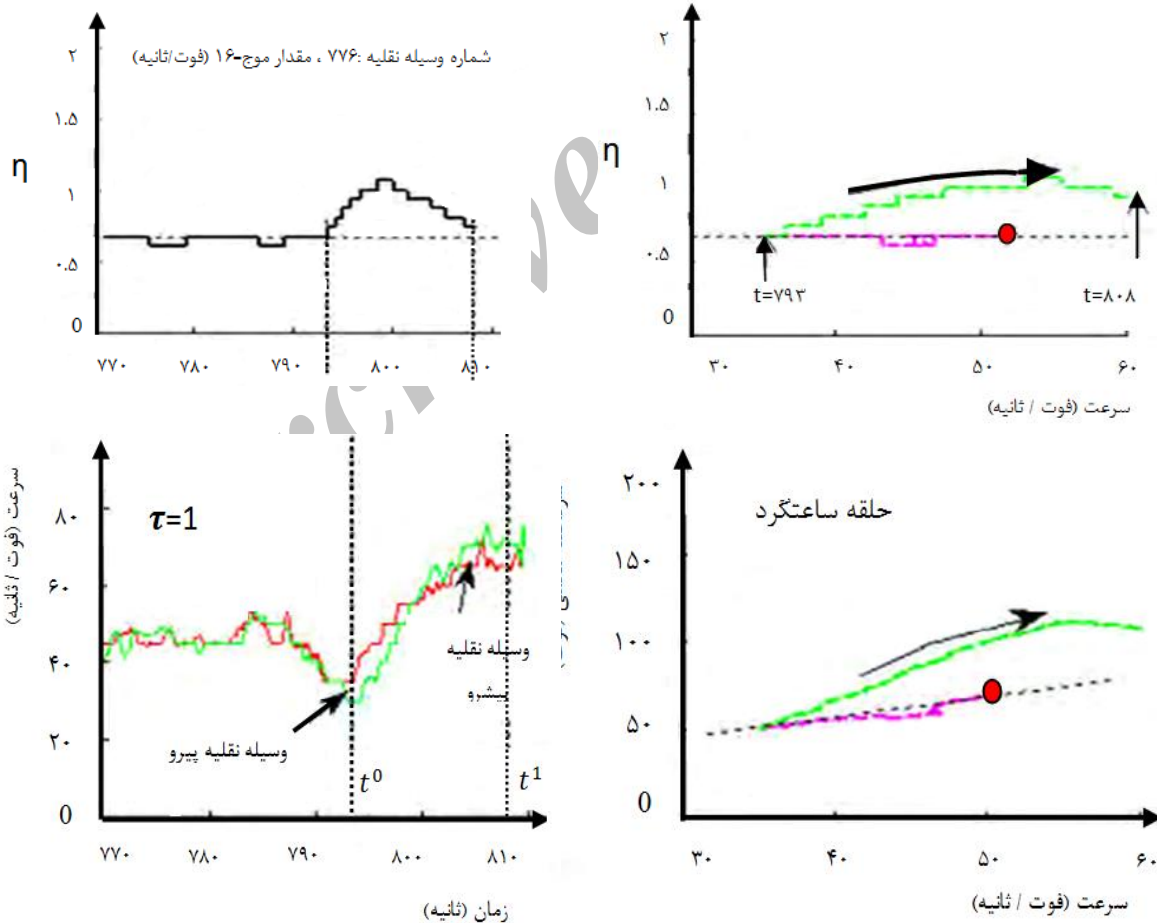
نتایج آنالیز داده‌های عبوری نشان می‌دهد که دو سناریو پاسخ دیر و زود اساساً تمایل به تشکیل حلقه‌های CW, CCW دارند. مطابق شکل (18)، هیستریسیس CW مبتنی بر سناریو پاسخ دیر در الگوی رفتاری مقعر و مطابق شکل (19) هیستریسیس CW مبتنی بر سناریو پاسخ زود در الگوی رفتاری محدب در هر دو دوره رشد و توسعه یافته ظاهر می‌گردد [chen et al., 2012].

4-7- پدیده هیستریسیس مبتنی بر سناریو پاسخ راننده

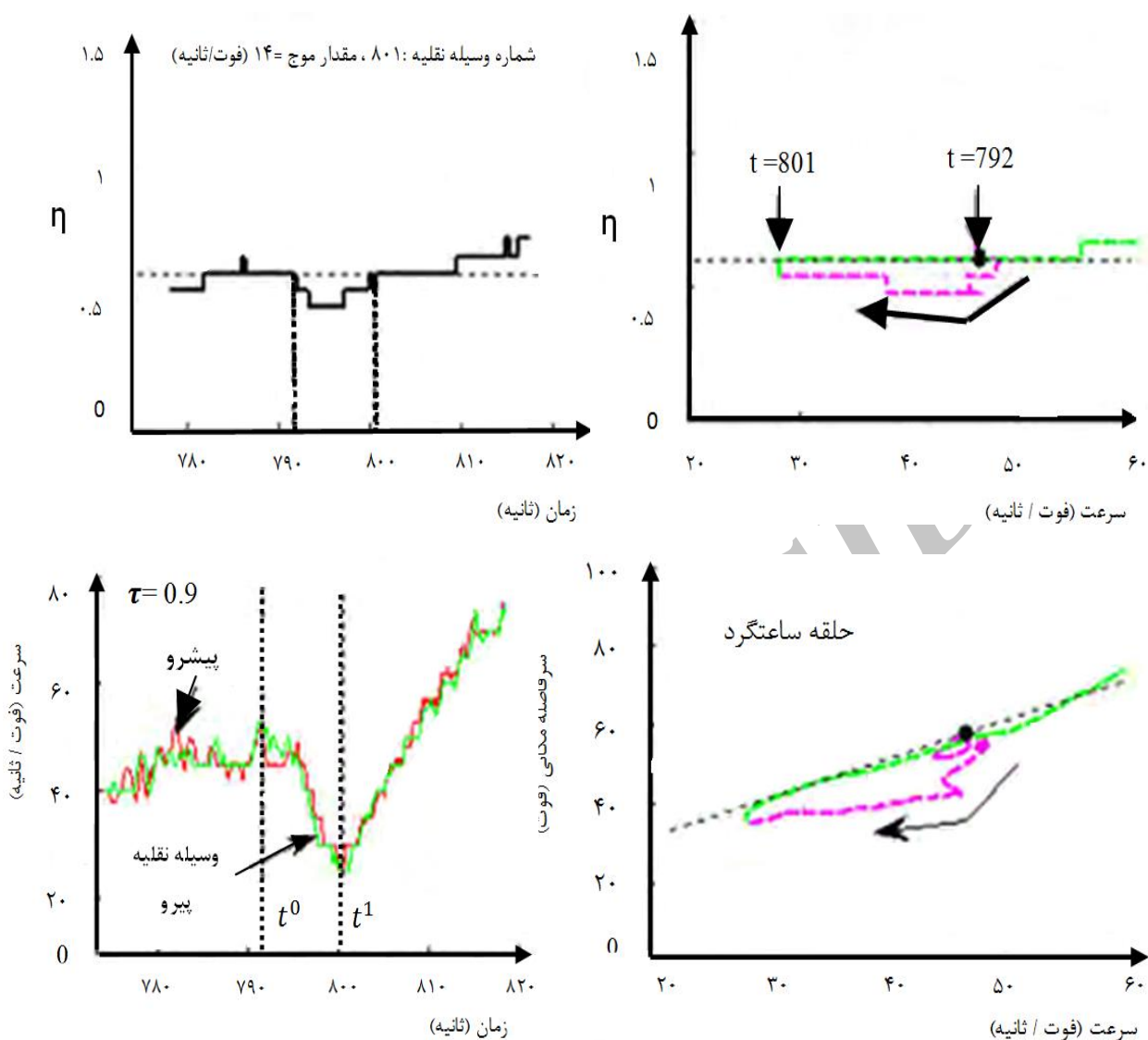
به منظور آنالیز نمودن الگوهای رفتاری در آشفتگی ترافیک، دو سناریو پاسخ دیر^{۲۰} و زود^{۲۱} راننده معرفی می‌شوند که دو فاکتور مهم در زمان اتفاق افتادن پدیده هیستریسیس ترافیکی می‌باشند.

1- سناریو پاسخ زود: مطابق شکل های (1-17 و 2-17) در وضعیت الگو 1، در مورد الگوهای مقعر و محدب، انحراف مقدار $\eta_i(t)$ از η_i^0 برای هر الگوی رفتاری در شروع فاز کاهش شتاب آغاز و در شروع فاز افزایش شتاب متوقف می‌گردد.

2- سناریو پاسخ دیر: مطابق شکل (1-17 و 2-17) در وضعیت الگو 2، در مورد الگوهای مقعر و محدب، انحراف مقدار $\eta_i(t)$ از η_i^0 برای هر الگوی رفتاری در پایان فاز



شکل 18. هیستریسیس ساعت گرد مبتنی بر سناریو پاسخ دیر در الگوی رفتاری مقعر [Chen, 2012]

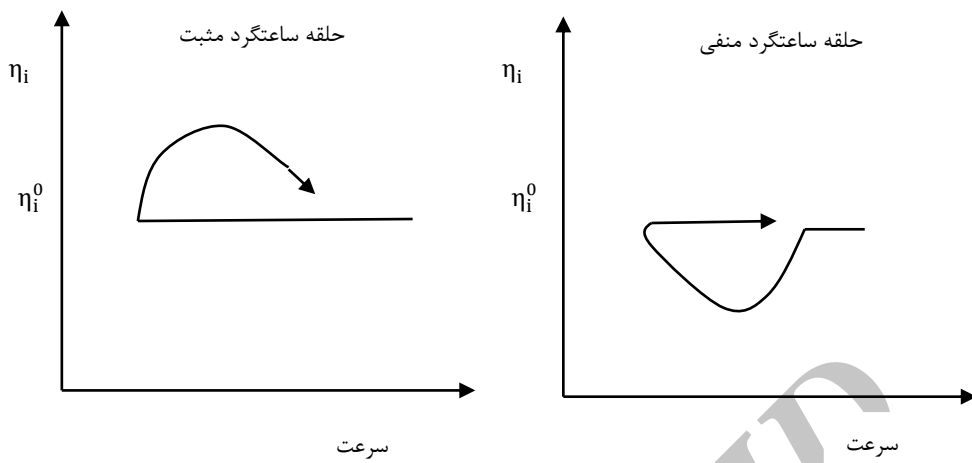


شکل 19. هیستریسیس ساعت گرد مثبتی بر سناریو پاسخ زود در الگوی رفتاری محدب [Chen, 2012]

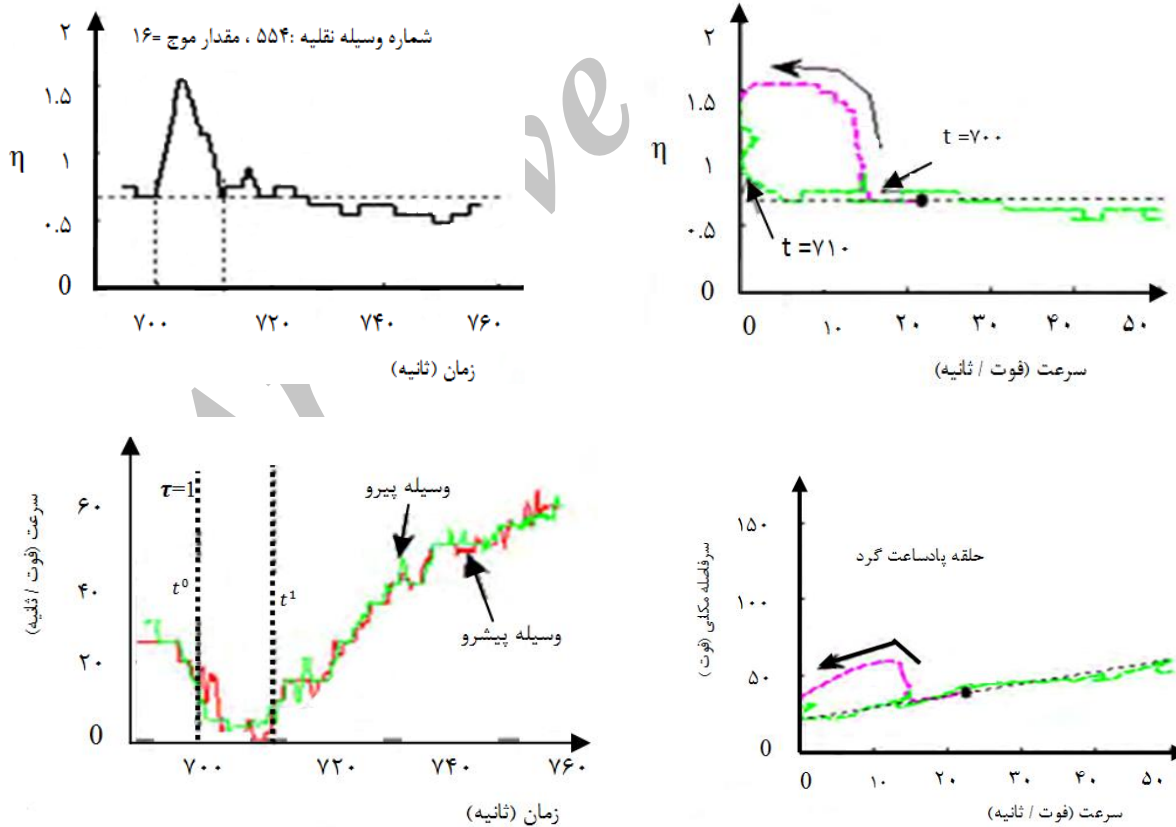
پاسخ دیر در الگوی رفتاری محدب تشکیل می‌گردند. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که اکثر حلقه‌های CCW در دوره رشد تمایل به سناریو پاسخ دیر و در دوره توسعه یافته تمایل به مکانیزم پاسخ زود دارند. به طور مشابه با حلقه‌های CW. حلقه‌های CCW تشکیل شده از طریق دو مکانیزم پاسخ دیر و زود متفاوت و به صورت CCW^+ و CCW^- تشکیل می‌گردند [chen et al., 2012].

مطابق شکل (20) حلقه‌های CW تشکیل شده مثبتی بر سناریو پاسخ دیر و زود متفاوت و به صورت حلقه‌های CW^+ و CW^- نمایان می‌گردد. زمانی که ناحیه احاطه شده به وسیله حلقه، انحراف مقدار $\eta_i(t)$ از η_i^0 ، بالا (پایین) مقدار η_i^0 باشد حلقه هیستریسیس به صورت CW^+ (CW^-) تشکیل می‌گردد.

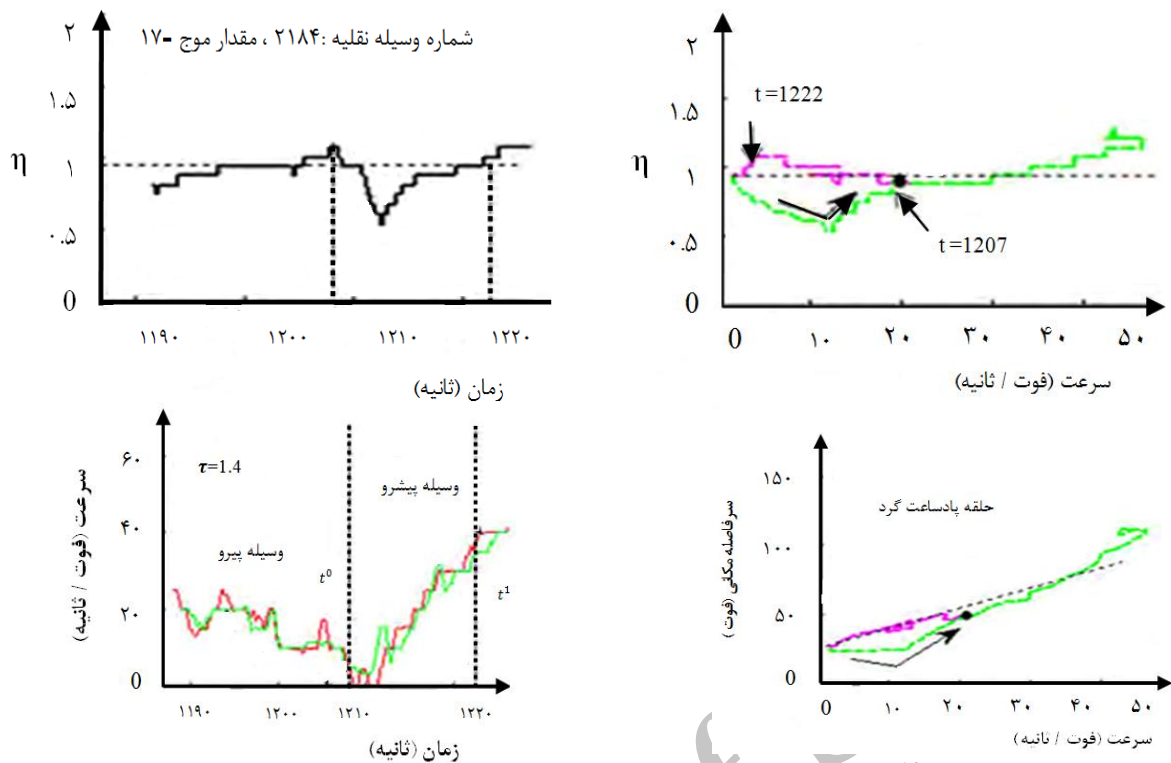
حلقه‌های CCW مثبتی بر سناریو پاسخ زود مطابق شکل (21)، در الگوی رفتاری مقعر و مطابق شکل (22) مثبتی بر سناریو



شکل 20. حلقه‌های ساعت‌گرد مثبتی بر سناریو پاسخ دیر و زود [Chen, 2012]



شکل 21. هیستریسیس پاد ساعت‌گرد مثبتی بر سناریو پاسخ زود در الگوی رفتاری مقعر [Chen, 2012]



شکل 12 - B

شکل 12 - B

شکل 22. هیستریسیس پادساعت گرد مبتنی بر سناریو پاسخ دیر در الگوی رفتاری محدب [Chen, 2012]

رشد و توسعه یافته تمایل به الگوی رفتاری محدب و سناریو پاسخ دیر دارد که پدیده هیستریسیس برای هر دو دوره رشد و توسعه یافته به صورت CCW^- تشکیل می‌گردد. راننده متعادل تمایل به الگوهای رفتاری مقعر، محدب و بدون کاهش دارد. در الگوی رفتاری مقعر، در هر دو دوره رشد و توسعه یافته و در مکانیزم پاسخ دیر، پدیده هیستریسیس به صورت CW^- ، در دوره توسعه و در مکانیزم پاسخ زود، پدیده هیستریسیس به صورت CCW^- تشکیل می‌گردد. دو الگوی محدب در دوره رشد و سناریو پاسخ زود، پدیده هیستریسیس به صورت CW^- و در الگوی بدون کاهش و در دوره رشد برای هر دو مکانیزم پاسخ، پدیده هیستریسیس CW^+ تشکیل می‌گردد [Chen et al., 2012].

5- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده هیستریسیس ترافیکی که معمولاً

4-8- نتایج پدیده هیستریسیس ترافیکی

نتایج آنالیز نشان می‌دهد که پدیده هیستریسیس ترافیک تابعی از رفتار راننده، دوره ایجاد و مکانیزم پاسخ راننده در آشفتگی جریان ترافیک می‌باشد. مطابق جدول (3)، نتایج نشان می‌دهد که دو فاکتور رفتار راننده و سناریو پاسخ راننده در توزیع پدیده هیستریسیس در هر دو دوره رشد و توسعه یافته می‌باشد که دایره‌های توپر و مربع‌های توخالی بیانگر حلقه‌های هیستریسیس CW (ccw) و درصد احتمال تشکیل هیستریسیس به صورت اندازه‌های دایره‌های توپر و توخالی ارائه می‌گردد. مکانیسم‌های هیستریسیس ترافیکی در دوره رشد و توسعه مبتنی بر الگوی رفتاری راننده ارائه می‌گردد که در دوره رشد، راننده پرخاشگر تمایل به الگوی رفتاری مقعر و بدون کاهش و سناریو پاسخ دیر دارد که پدیده هیستریسیس برای هر دو به صورت CW^+ تشکیل می‌گردد و در دوره توسعه، راننده پرخاشگر تمایل به الگوی رفتاری مقعر دارد که برای سناریو پاسخ زود پدیده هیستریسیس به صورت CCW^+ و برای پاسخ دیر به صورت CW^+ تشکیل می‌گردد. راننده محتاط در هر دوره آشفتگی

ترافیکی، مانند تحقیق در مورد مکانیزم شکل و انتشار آشفستگی استفاده گردد تا اثرات منفی آشفستگی ترافیکی مدیریت شود. مبتنی بر آنالیز مدل نامتقارن رفتاری، ناهمگن^{۲۲} بودن رانندگان که ذاتی می‌باشد سبب شکل و انتشار یافتن آشفستگی ترافیکی می‌گردد. نتایج آماری نشان می‌دهند که مدل نامتقارنی را می‌توان به‌وسیله سه پارامتر $\eta_i^0, \eta_i^T, \varepsilon_i$ معرفی نمود بدون آن‌که

درآشفستگی‌های ترافیکی آزادراه‌ها پدیدار می‌گردد مبتنی بر داده‌های عبوری NGSIM قبل و بعد از آشفستگی ترافیکی آنالیز گردید و مدل نامتقارن رفتار راننده قبل و بعد از آشفستگی ترافیکی، با معرفی نمودن پنج پارامتر $\eta_i^0, \eta_i^T, \eta_i^1, \varepsilon_i^0, \varepsilon_i^1$ برای هر گروه راننده، OA, OT, ON، تعریف گردید. هر گروه راننده ویژگی‌های مختلفی در ازدحام ترافیکی دارند که ویژگی‌های رانندگان به پاسخ‌هایشان به آشفستگی ترافیکی مرتبط می‌گردد. این مدل می‌تواند به‌عنوان اساس مطالعه در آشفستگی

جدول 3. نتایج الگوهای هیسترسیس مبتنی بر رفتار راننده و دوره‌های آشفستگی [Chen 2012]

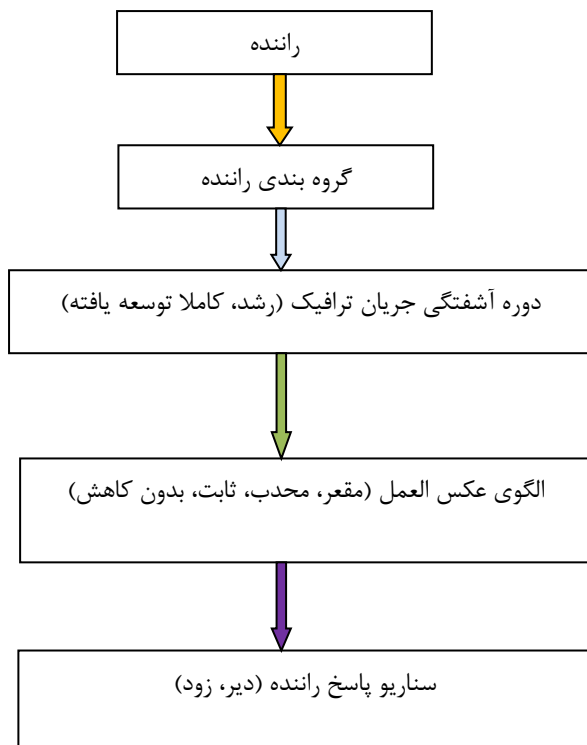
	راننده پرخاشگر						راننده محتاط						راننده متعادل					
	الگوی مقعر		الگوی بدون کاهش		الگوی محدب		الگوی مقعر		الگوی بدون کاهش		الگوی محدب		الگوی مقعر		الگوی بدون کاهش		الگوی محدب	
پاسخ	زود	دیر	هر دو	زو	دیر	د	زود	دیر	هر دو	زو	دیر	د	زود	دیر	هر دو	زو	دیر	د
الگوی هیسترسیس	CCW ⁺	CW ⁺	CW ⁺	CW ⁻	CCW ⁻	CCW ⁺	CW ⁺	CW ⁺	CW ⁻	CCW ⁻	CCW ⁻	CW ⁻	CW ⁺	CW ⁻	CCW ⁻	CCW ⁻	CCW ⁻	CCW ⁻
مورد رشد		●	●								■		●	●	●	●		
مورد کاملاً توسعه‌یافته	■	●									■	■	●					

■ : CCW , ● : CW

گرفته شوند. شبیه‌سازی مرحله ایجاد آشفستگی با استفاده نمودن از سرعت وسیله نقلیه پیشرو نتیجه می‌شود، زمانی که سرعت وسیله نقلیه پیشرو به صفر می‌رسد مرحله کاملاً توسعه‌یافته آشفستگی آغاز می‌گردد در صورتی که قبل از آن، مرحله رشد می‌باشد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که الگوهای پاسخ راننده در سناریو پاسخی زود، در آغاز موج کاهش شتاب، و سناریو پاسخی دیر، در آغاز موج افزایش شتاب اتفاق می‌افتد. مطابق شکل (23) روش تحلیل به منظور شبیه‌سازی ارائه می‌گردد که هر سه مورد گروه‌بندی راننده، مرحله ایجاد آشفستگی و الگوی پاسخ راننده به سناریو پاسخی دیر و زود مرتبط می‌گردند و رفتار راننده به چهار لایه زیر تقسیم می‌گردد:

- 1) گروه‌بندی راننده، OA, OT, ON
- 2) مرحله ایجاد آشفستگی: رشد و کاملاً توسعه‌یافته

تغییری در ویژگی‌های راننده در سطح کلی نگر ایجاد شود. مبتنی بر مدل نامتقارنی، گروه‌بندی رفتار راننده برحسب پارامتر η_i^t انجام می‌گردد که $\eta_i^0 \ll 1$ بیانگر رفتار راننده پرخاشگر، OA، $\eta_i^0 \gg 1$ بیانگر رفتار راننده محتاط، OT و $\eta_i^0 = 1$ بیانگر رفتار راننده متعادل، ON می‌باشد و همچنین الگوی پاسخ رفتاری راننده در آشفستگی ترافیکی به چهار الگوی مقعر، محدب، ثابت و بدون کاهش تقسیم‌بندی گردید. نتایج آنالیز نشان می‌دهد زمانی که الگوی رفتاری راننده به آشفستگی‌های ترافیکی در نمودار $V-\eta$ نامتقارن باشد، پدیده هیسترسیس ترافیکی ایجاد می‌شود. از دیدگاه مدل‌سازی نمودن، نتایج نشان می‌دهد که مرحله ایجاد آشفستگی، دوره رشد و دوره کاملاً توسعه‌یافته و دو سناریو پاسخی راننده، سناریو پاسخی زود و دیر، در مدل‌سازی نمودن رفتار وسیله نقلیه پیرو باید در نظر



شکل 23. شبیه‌سازی روش تحلیل

7-مراجع

- Ahn, S., Cassidy, M.J., (2007), Freeway traffic oscillations and vehicle lane-changing maneuvers. The 17th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, pp.691-710.
- Ahn, S., Cassidy, M.J., Laval, J., (2004), Verification of a simplified car-following theory. Transportation Research Part B 38 (5), pp.431-440.
- Ahn, S., (2005), Growth of Oscillations in Queued Traffic. Ph.D. Thesis, Depart. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Ahn, S., S. Vadlamani, J. A. Laval and D. Chen. (2011), A Method to Account for Non-Steady Conditions in Measuring Traffic Hysteresis. Submitted.
- 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), pp.1098-1108.
- Chen, D.; Laval, J. A.; Ahn, S.; Zheng, Z. (2012), Microscopic Traffic Hysteresis in Traffic Oscillations: A Behavioral Perspective. Transportation Research Part B 46(10): pp.1440-1453.
- Chen, D.; Laval, J. A.; Zheng, Z; and Ahn, S. (2012), Traffic Oscillations: A Behavioral Car-Following Model. Transportation Research Part

3) الگوهای پاسخی: مقعر، محدب، ثابت، بدون کاهش

4) سناریو پاسخ: زود و دیر

نتایج آماری آنالیز مطابق جدول (1)، همبستگی بین چهار لایه تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد و این‌که هر گروه راننده در چه مرحله‌ای از آشفته‌گی تمایل به کدام سناریو پاسخ دیر و زود و پدیده هیسترسیس برای هر سناریو پاسخی چگونه پدیدار می‌گردد.

6-پی‌نوشت‌ها

- 1- Relaxation Dominate
- 2- Anticipation Dominate
- 3- Anticipation-Relaxation Balanced
- 4- Gap-Time
- 5- Gap-Distance
- 6- Coasting
- 7- Stationary
- 8- Homogeneous
- 9- Laval,Leclercq
- 10- Concave
- 11- Convex
- 12- Constant
- 13- Constant
- 14- Non Decreasing
- 15- Overlap
- 16- Straight Line
- 17- Multiple Loops
- 18- Growth Period
- 19- Fully – Developed Period
- 20- Late Response
- 21- Early Response
- 22- Heterogeneity

- 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, pp.698–716.
- 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, pp. 213–219.
- Wilson, R.E., 2008. Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models. Philosophical Transactions of the Royal Society A 366 (1872), pp.2017–2032.
- 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), pp. 3–18.
- Yeo, H., Skabardonis, A., (2009), Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory. In: Lam, W.H.K., Wong, S.C., Lo, H.K. (Eds.), Proceedings of the 18th Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory, pp. 99–115.
- Zheng, Z., Ahn, S., Monsere, C.M., (2010), Impact of traffic oscillations on freeway crash occurrences. Accident Analysis and Prevention 42 (2), 626–636.
- 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), pp.372–384.
- Zheng, Z., Ahn, S., Chen, D., Laval, J.A., (2011), Freeway traffic oscillations: microscopic analysis of formations and propagations using wavelet transform. The 19th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, pp.717–731.
- Zhang, H. M. A mathematical theory of traffic hysteresis. Transportation Research Part B, Vol. 33, 1999, pp. 1-23.
- Zhang, H.M., Kim, T., (2005), A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow. Transportation Research Part B 39 (5), pp.385–399.
- B, 46(6): pp.744-761.
- Edie, L.C., 1961. Car-following and steady-state theory for non-congested traffic. Operations Research 9 (1), pp.66–76.
- Koshi, M., Kuwahara, M., Akahane, H., (1992), Capacity of sags and tunnels in Japanese motorways. ITE Journal (May issue), pp.17–22.
- Laval, J., (2006), stochastic processes of moving bottlenecks: approximate formulas for highway capacity. Transportation Research Record 1988 (1), pp.86–91.
- Laval, J., Chen, D., Amer, K., Guin, A., Ahn, S., (2009), Evolution of oscillations in congested traffic. Transportation Research Record 2124 (1), pp.194–202.
- 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, pp. 521–526.
- Laval, J.A., Daganzo, C.F., (2006), Lane-changing in traffic streams. Transportation Research Part B 40 (3), pp.251–264.
- Laval, J. A. Hysteresis in Traffic Flow Revisited: An Improved Measurement Method. Transportation Research Part B: Methodological, Vol. In Press, Corrected Proof, 2010, pp.135-137.
- 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 368(1928): pp.4519-4541.
- Mauch, M., Cassidy, M.J., (2002), Freeway traffic oscillations: observations and predictions. The 15th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory, pp.653–673.
- Newell, G.F., (1962), Theories of instability in dense highway traffic. Journal of the Operations Research Society of Japan 5, pp.9–54
- Newell, G.F., (2002), a simplified car-following theory: a lower order model, Transportation Research Part B 36: pp.196-205.

-
- ¹ Relaxation dominate
 - ² Anticipation dominate
 - ³ Anticipation-Relaxation balanced
 - ⁴ Gap-time
 - ⁵ Gap-distance
 - ⁶ Coasting
 - ⁷ Stationary
 - ⁸ Homogeneous
 - ⁹ Laval, Leclercq
 - ¹⁰ Concave
 - ¹¹ Convex
 - ¹² Constant
 - ¹³ Constant
 - ¹⁴ Non decreasing
 - ¹⁵ Overlap
 - ¹⁶ Straight line
 - ¹⁷ Multiple loops
 - ¹⁸ Growth period
 - ¹⁹ Fully – developed period
 - ²⁰ Late response
 - ²¹ Early response
 - ²² Heterogeneity

Archive of SID