

تحلیل ترافیک حرکت - توقف در زنجیره وسایل نقلیه عبوری مبتنی بر تئوری نامتقارنی

علی عبدی^{۱*}، ارسلان صالحی کلام^۲، محمود صفارزاده^۳ و غلامرضا مهدی زاده^۴

^۱ استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

^۲ دانشجوی دکتری عمران - راه و ترابری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۴ دانشجوی دکتری عمران - راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران

(دریافت: ۹۴/۱۰/۱۰، پذیرش: ۹۵/۴/۱۲، نشر آنلاین: ۹۵/۴/۱۳)

چکیده

آنالیز ترافیک حرکت-توقف که به سبب دلایل غیر قابل پیش‌بینی مکرراً در آزادراه‌ها مشاهده می‌گردد به منظور مدل‌سازی شکل و انتشار آشفتنگی و تخمین اثرات ازدحام در جریان ترافیک مهم می‌باشد. تئوری‌های بسیار زیادی در علم ترافیک به منظور شناسایی ازدحام ترافیکی مبتنی بر قوانین علم فیزیک مانند ترمودینامیک و سیالات ارائه گردیده است؛ اما این تئوری‌ها تا کنون نتوانستند پیچیدگی پاسخ‌های مختلف رانندگی در وضعیت‌های مختلف ترافیکی را به ویژه در ازدحام ترافیکی، توضیح بدهند. در این مقاله، به منظور شناسایی نمودن ترافیک حرکت-توقف در سطح جزئی‌نگر، مبتنی بر تئوری نامتقارنی و داده‌های عبوری NGSIM، جریان ترافیک به پنج فاز: جریان آزاد، فاز افزایش و کاهش شتاب، کرانه‌ای، پایدار تقسیم‌بندی می‌گردد که جریان ترافیک در محدوده بین دو منحنی فاز افزایش و کاهش شتاب در تعادل ترافیکی می‌باشد. مبتنی بر تئوری نامتقارنی، ویژگی‌های پاسخ رفتاری متداول رانندگی، خطاهای عملکردی، پیش‌بینی و همچنین آنالیز و توصیف دقیقی از تحلیل و انتقال حلقه ترافیک حرکت-توقف به سه مورد ایجاد، رشد و ناپدید شدن امواج حرکت-توقف ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: حلقه عمر ترافیک حرکت-توقف، تئوری نامتقارنی، پاسخ‌های رفتاری راننده، داده‌های عبوری NGSIM

۱- مقدمه

اشباع و تخمین زدن اثرات ازدحام مهم می‌باشد؛ اما به سبب فقدان داده‌های عبوری ترافیک، شناسایی ویژگی‌های ترافیک حرکت-توقف، به منظور مدل‌سازی نمودن ترافیک در نمودار فاصله-زمان مبهم می‌باشد. مختل شدن حرکت رانندگان وسایل نقلیه تحت شرایط محدودیت‌های رفتاری به دلیل حرکت وسایل نقلیه دیگر که بیانگر وابسته بودن شکل‌گیری و انتشار آنی و از بین رفتن ترافیک حرکت-توقف به الگوهای رفتاری رانندگان در ازدحام ترافیکی می‌باشد منجر به ضرورت تحقیق مطالعات در مدل رفتاری رانندگان می‌شود. تئوری LWR نخستین مدل به منظور توضیح دادن پویایی ترافیک می‌باشد که مطابقت‌های مناسبی با مشاهدات تجربی در ترافیک ازدحام در سطح جزئی-نگر دارد اما به طور رضایت بخش نمی‌تواند مکانیزم ترافیک حرکت-توقف را توضیح دهد (Lighthill و Whitham، ۱۹۵۵؛

ترافیک حرکت-توقف معمولاً به دلیل حجم ترافیک زیاد ناشی از قفل شدن خط عبوری تشکیل و باعث تأخیر غیر ضروری در سفر و اتلاف زیاد انرژی و خطرات ایمنی می‌گردد (Bilbao، ۲۰۰۸؛ Zheng و همکاران، ۲۰۱۱ الف و ب). مانورهای تغییر خط (Ahn و Cassidy، ۲۰۰۷؛ Laval و Daganzo، ۲۰۰۶؛ Laval، ۲۰۰۵) و گلوگاه‌های ترافیکی در حال حرکت^۱ (Koshi و همکاران، ۱۹۹۲؛ Laval، ۲۰۰۶) منجر به تشکیل و انتشار موج آشفتنگی در جریان ترافیک می‌گردند. به سبب این ویژگی‌های متنوع، مدل و درک نمودن ترافیک حرکت-توقف به منظور مدل‌سازی نمودن شکل و انتشار ترافیک

1. Moving bottleneck

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس:

مدل‌های سلولی^۳ جریان ترافیک با یکدیگر مطابقت دارند. نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب نخستین بار توسط Forbes (۱۹۶۳)، Edie (۱۹۶۵)، و Foote (۱۹۶۵) مشاهده گردید. Forbes (۱۹۶۳) اشاره نمود که پاسخ راننده در فاز افزایش شتاب نسبت به کاهش شتاب سریع‌تر می‌باشد. زمان پاسخ راننده و نرخ جریان رابطه‌ای معکوس دارند به عبارت دیگر هر چه زمان پاسخ راننده کم‌تر باشد، نرخ جریان بیشتر می‌شود. Foote (۱۹۶۵) داده‌های زنجیره‌ای عبوری را به سه نوع، سرعت ثابت، افزایش شتاب، کاهش شتاب تقسیم‌بندی نمود و مشخص گردید که زنجیر کاهش شتاب، نرخ جریان بیشتری نسبت به انواع زنجیره‌ای دیگر در سرعت ثابت دارد. Edie (۱۹۶۵) نمودار نرخ جریان- چگالی زنجیر سیزده وسیله‌ای را برای دو بازه زمانی سی و پنج ثانیه‌ای از داده‌های جمع‌آوری شده رسم نمود و متوجه گردید که نرخ جریان برای سرعت معین در فاز کاهش شتاب نسبت به فاز افزایش شتاب بیشتر می‌باشد. مبتنی بر نتایج Forbes (۱۹۶۳)، Edie (۱۹۶۵)، و Foote (۱۹۶۵) که رفتار نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب اشاره نمودند، Newell دو منحنی مجزا برای فاز افزایش و کاهش شتاب در ترافیک ازدحام پیشنهاد نمود. مبتنی بر این تئوری نامتقارنی، سرفاصله مکانی در فاز افزایش شتاب همیشه بزرگ‌تر از فاز کاهش شتاب می‌باشد و نامتقارنی بین دو فاز افزایش و کاهش شتاب منجر به تشکیل شدن حلقه‌ای ساعتگرد در نمودار نرخ جریان- چگالی می‌گردد.

Zheng و همکاران (۲۰۱۰) و Laval و Leclercq (۲۰۱۰) رفتار راننده پرخاشگر و محتاط را دلیل پراکنده شدن ویژگی‌های ترافیک در ناحیه ازدحام داده‌های ترافیکی واقعی معرفی نمودند. Zielke و همکاران (۲۰۰۸) سرعت موج متوسط و دوره زمانی آشفتگی هر منطقه را مقایسه نمودند، اما ویژگی‌های متفاوت هندسی منطقه‌ها را در نظر نگرفتند. در این مقاله مبتنی بر تئوری رفتار نامتقارنی و داده‌های عبوری NGSIM، نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب و فازبندی جریان ترافیک و همچنین توصیفی از مکانیزم انتقال بین منحنی افزایش و کاهش شتاب ارائه می‌گردد. با گسترش تئوری نامتقارنی ویژگی‌های پاسخ رفتاری راننده مانند خطاهای عملکردی و پیش‌بینی آنالیز و مکانیزی به منظور توصیف ترافیک حرکت- توقف در ازدحام ترافیکی و انتقال مورد ایجاد، رشد، ناپدید شدن موج حرکت- توقف بیان می‌گردد.

Richards (۱۹۵۶)، Daganzo (۱۹۹۷) محدودیت‌های مدل LWR را تفاوت رفتاری راننده در آشفتگی ترافیک معرفی نمود. Banks (۱۹۹۱) و Nagel و Nelson (۲۰۰۵) محدودیت‌های تئوری LWR را جریان ناپایدار، ترمز ناگهانی، پدیده دو ظرفیتی و Bankes افت ظرفیت بیان نمودند. Kerner و Rehborn (۱۹۹۶) و (۱۹۹۹) و Kerner (۲۰۰۴) از طریق آنالیز نمودن داده‌های عبوری جمع‌آوری شده، جریان ترافیک را به سه فاز، جریان آزاد، جریان هم‌زمان^۲ و اشباع در حال حرکت گسترده تقسیم‌بندی و ترمز ناگهانی را به عنوان علت اصلی ترافیک حرکت- توقف ارائه نمودند. اما این تئوری نتوانست به طور واضح اختلاف در رفتار رانندگی بین نرخ جریان هم‌زمان و اشباع در حال حرکت را بیان کند. Ahn و Cassidy (۲۰۰۷) و Daganzo (۲۰۰۶) مانورهای تغییر خط را عامل ایجاد موج حرکت- توقف معرفی نمودند و اثر ترمز ناگهانی در تولید موج حرکت- توقف محدود گردید.

Newell (۲۰۰۲) مدل تعقیب خودرو ساده‌ای پیشنهاد نمود که حرکت طولی تعقیب خودرو به دو فاکتور زمان عکس‌العمل و سرفاصله مکانی اشباع مرتبط می‌گردد. اما به سبب موازی بودن مسیر وسیله پیرو با پیشرو، سرعت‌های موج حرکت- توقف برای هر دو فاز افزایش و کاهش شتاب یکسان می‌شود در حالی که در ترافیک واقعی، مسیرهای عبوری موازی نیستند و سبب محدودیت استفاده از مدل تعقیب خودرو Newell در توصیف موج حرکت- توقف می‌شود. مدل Del Castillo (۲۰۰۱) مسیرهای عبوری را غیر موازی اما سرعت موج را مساوی در نظر گرفت و اشاره نمود که آشفتگی ترافیک مطابق با چگالی ترافیک، رشد یا ناپدید می‌شود.

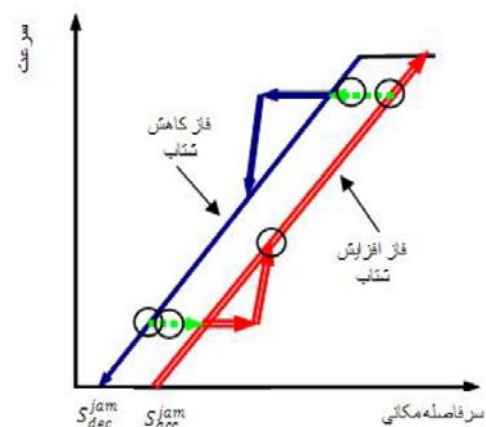
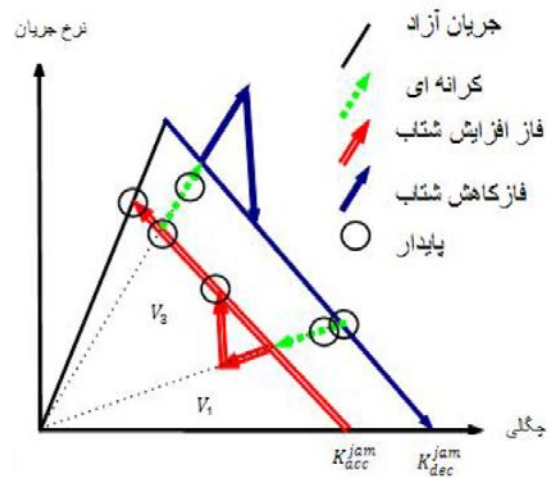
Kim و Zhang (۲۰۰۴) سرفاصله زمانی بین وسایل نقلیه را اختیاری در نظر گرفتند که در هر لحظه زمانی برای هر راننده تغییر می‌کند و باعث سرعت‌های موج مختلف برای فاز افزایش و کاهش شتاب گردید.

به طور کلی Del Castillo (۲۰۰۱) و Kim و Zhang (۲۰۰۴) اشاره نمودند که پراکندگی سرفاصله مکانی در ویژگی ترافیک حرکت- توقف مؤثر می‌باشد. برای نمونه، با سرفاصله زمانی بزرگ‌تر، موج حرکت- توقف ناپدید و سرفاصله مکانی کوچک‌تر، موج حرکت- توقف در زنجیر وسایل نقلیه پیرو رشد می‌کند. Gipps (۱۹۸۱) مدل تعقیب خودرویی مبتنی بر رفتار رانندگی و انتظار برای ترافیک پایین دست ارائه نمود و محدودیت‌هایی برای راننده و پارامترهای عملکرد وسیله نقلیه به دلیل ایمنی، اجتناب از برخورد، در نظر گرفت. Daganzo (۲۰۰۶) ثابت نمود که مدل تعقیب خودرو Newell، مدل موج حرکت مبتنی بر نمودار نرخ جریان- چگالی مثلثی شکل و

۲- روش تحقیق

۲-۱- فازبندی جریان ترافیک مبتنی بر تئوری نامتقارنی ترافیک

مطابق شکل (۱)، جریان ترافیک مبتنی بر آنالیز داده‌های عبوری NGSIM به پنج وضعیت متفاوت، فاز افزایش شتاب، فاز کاهش شتاب، فاز کرانه‌ای، ثابت، جریان آزاد فازبندی می‌گردد. در شکل (۱) ارتباط بین نمودار نرخ جریان-چگالی، سرعت-سرفاصله مکانی مبتنی بر این تئوری نامتقارن ارائه می‌گردد که این تئوری نامتقارنی، توصیف و مکانیزمی از انتقال بین فازها و تعادل فازهای ترافیک را در ناحیه بین دو منحنی A و D ارائه می‌دهد و همچنین پتانسیل توضیح دادن پدیده‌های پیچیده ترافیکی به سبب رفتار راننده در وضعیت ترافیک ازدحام را دارد (Yeo, ۲۰۰۸؛ Yeo و Skabardonis, ۲۰۰۹).



شکل ۱- فازبندی جریان ترافیک مبتنی بر تئوری نامتقارنی (Yeo, ۲۰۰۸)

۲-۱-۱- جریان آزاد

وضعیت ترافیکی است که آشفتگی کوچک در جریان بالادست اثر نگذارد. به عبارت دیگر، اگر وسیله‌ای در جریان آزاد باشد، تغییر سرعت ناچیز وسیله نقلیه پیشرو باعث کاهش سرعت وسیله پیرو نشود و رانندگان در جریان آزاد با سرعت مطلوب، ماگزیمم سرعت مجاز، رانندگی کنند.

۲-۱-۲- فاز افزایش و کاهش شتاب

در منحنی سرعت-سرفاصله مکانی برای یک وسیله منحنی افزایش، منحنی A، منحنی کاهش شتاب، منحنی D، از وصل نمودن نقاطی که عمل افزایش شتاب، شتاب وسیله نقلیه بزرگ-تر از یک فوت بر مجذور ثانیه و عمل کاهش شتاب، شتاب وسیله نقلیه کم تر از یک فوت بر مجذور ثانیه نتیجه می‌گردد.

۲-۱-۳- فاز پایدار

از دیدگاه جزئی نگر، فاز پایدار وضعیت ترافیکی است که سرعت و سرفاصله مکانی بین دو وسیله ثابت باشد اما در جریان ترافیک ثابت ماندن این دو متغیر غیر ممکن است بنابر این وضعیت جریان ترافیک پایدار در شرایط زیر می‌تواند وجود داشته باشد:

$$|dSndt| \leq TH_s, |dVndt| \leq TH_v \quad (1)$$

TH_s : مقدار آستانه سرفاصله مکانی در حدود ۵ متر

TH_v : مقدار آستانه سرعت که در حدود ۳-۵ کیلومتر بر ساعت

به عبارت دیگر، اگر کاهش سرفاصله مکانی وسیله نقلیه پیشرو سبب کاهش سرعت ترافیک پیرو نشود و سرعت ثابت زنجیر حفظ و آشفتگی ترافیک از بین رود ترافیک پایدار می‌باشد در غیر این صورت، موج حرکت-توقف به بالادست انتشار یابد ترافیک عبوری ناپایدار می‌باشد.

۲-۱-۴- فاز کرانه‌ای

وضعیت ترافیکی است که راننده سرعتش را ثابت حفظ می‌کند در حالی که سرفاصله مکانی به دلیل کاهش یا افزایش شتاب وسیله پیشرو بین دو منحنی A و D در حال کاهش یا افزایش می‌باشد به عبارت دیگر فاز کرانه‌ای، فاز انتقال در بین دو منحنی A و D می‌باشد.

۳- امواج حرکت-توقف

۳-۱- ارتباط زمان با زمان سفر موج

مبتنی بر تحقیقات انجام شده، متفاوت بودن زمان عکس-العمل راننده برای حرکت‌های روبه جلو با زمان پاسخ واقعی

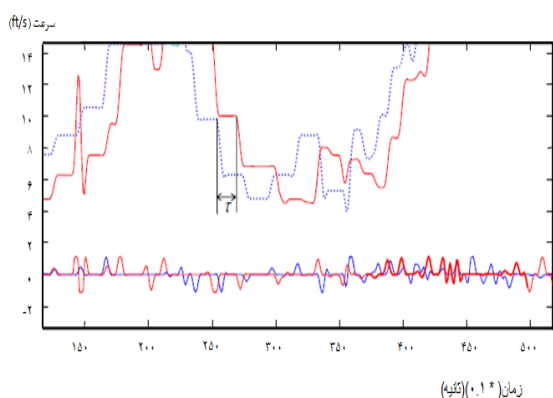
زمان انتشار موج و فاصله سفر موج شوک برای تغییر از وضعیت A به وضعیت B برابر با:

$$d = V_2 t_w - S_2 \quad (2)$$

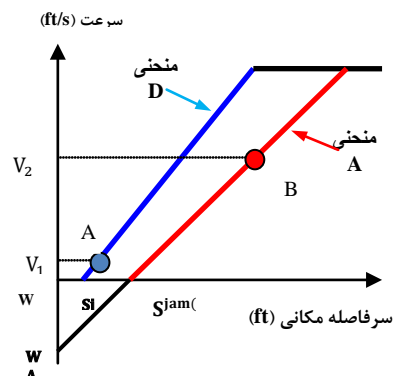
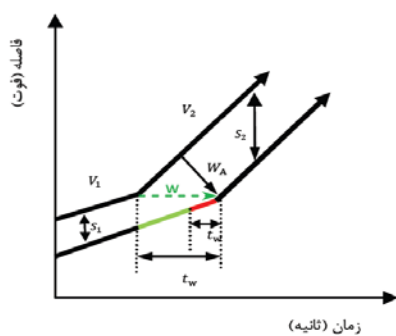
$$t_w = (S_2 - S_1) / (V_2 - V_1) \quad (3)$$

بنابر این سرعت موج W برابر است با عرض از مبدا خطی که دو نقطه A، B را به یکدیگر وصل می‌کند:

$$W = (V_2 t_w - S_2) / t_w = V_2 - S_2 (V_2 - V_1) (S_2 - S_1) \quad (4)$$



شکل ۳- اندازه‌گیری زمان سفر موج (Yeo و Skabardonis, ۲۰۰۹)

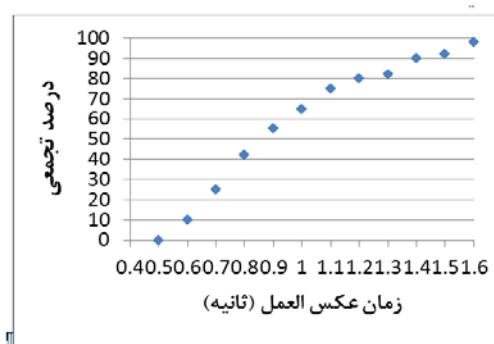


شکل ۴- سرعت موج شوک مبتنی بر تئوری نامتقارنی (Yeo, ۲۰۰۸)

راننده که از اندازه‌گیری نمودن تغییر سرعت پیشرو به تغییر سرعت پیرو در جاده تعیین می‌شود منجر به استفاده زمان سفر موج به جای زمان پاسخ می‌شود. Zhang و Kim (۲۰۰۴) زمان عکس‌العمل را زمان عکس‌العمل طبیعی^۴ و زمان سفر موج را به عنوان زمان عکس‌العمل واقعی معرفی نمودند. Harris و Trigs (۱۹۸۲) مطابق شکل (۲) زمان عکس‌العمل در وسیله پیرو را برای وضعیت کاهش شتاب ارائه نمودند که از اندازه‌گیری نمودن فاصله زمانی بین چراغ ترمز وسیله پیشرو و چراغ وسیله پیرو تعیین می‌شود، پراکندگی مقادیر در محدوده ۰/۵ تا ۱/۶ ثانیه‌ای می‌باشد و بیشتر مقادیر (۸۰ درصد) در محدوده ۰/۶ تا ۱/۳ ثانیه‌ای می‌باشد.

Yeo و Skabardonis (۲۰۰۹) مطابق شکل (۳) مبتنی بر داده‌های عبوری NGSIM با اندازه‌گیری نمودن تغییرات سرعت وسیله پیرو و پیشرو، پراکندگی زمان سفر موج را در محدوده ۰ تا ۵ ثانیه به دست آوردند. زمان سفر موج، t_w را می‌توان به وسیله اندازه‌گیری نمودن اختلاف زمان بین نقاط عمل دو وسیله اندازه‌گیری نمود. اگر وسیله پیشرو در زمان t_1 و وسیله پیرو در زمان t_2 شروع به کاهش شتاب باشند با تأمین شرایط زیر، مقدار زمان سفر موج را می‌توان برابر با $t_2 - t_1$ تعیین نمود.

سرعت وسیله پیرو باید کم‌تر از سرعت جریان آزاد باشد. هر دو وسیله باید در سرعت ثابت قبل از عمل، کاهش شتاب، حرکت کنند. هر دو وسیله باید در سرعت مشابه قبل از عمل وسیله پیشرو در حال حرکت باشند.



شکل ۲- زمان عکس‌العمل در وسیله پیرو (Harris و Trigs, ۱۹۸۲)

۲-۳- سرعت موج شوک مبتنی بر تئوری نامتقارنی
 زمان سفر وسیله نقلیه پیرو در جریان ترافیک به دو پارامتر سرعت و سرفاصله مکانی مرتبط می‌گردد. مطابق شکل (۴) دو وضعیت A و B را فرض کنید که دو منحنی متفاوت در نمودار سرعت- سرفاصله می‌باشند.

۴- رفتار رانندگی مبتنی بر تئوری نامتقارنی

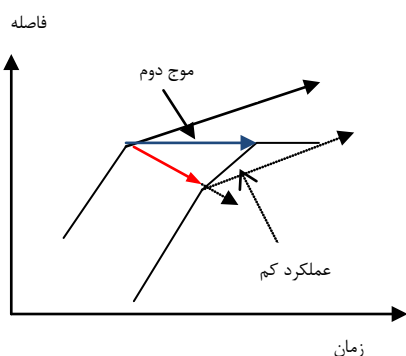
آنالیز رفتار راننده در سطح جزئی‌نگر مبتنی بر آنالیز گسترده مسیرهای عبوری وسایل نقلیه بیانگر رفتار پیچیده راننده مانند پاسخ‌های مختلف راننده در وضعیت‌های مختلف ترافیکی، خطاهای عملکردی^۵ و اختلاف در رفتار رانندگی می‌باشد. خطاهای عملکردی و پیش‌بینی^۶ دو الگوی مشاهده شده متداول رفتار راننده در آنالیز داده‌های عبوری می‌باشند.

۴-۱- خطاهای عملکردی

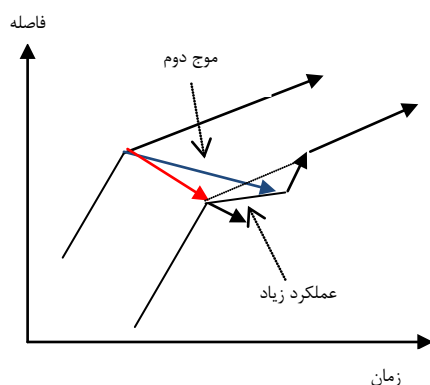
رانندگان در تنظیم نمودن سرعتشان به دلیل خطاهای درک^۷، تخمین^۸ و عملکردی در ترافیک عبوری دقیق عمل نمی‌کنند. تخمین به معنی روش‌های ارزیابی و بررسی نمودن پاسخ عملیات‌های درک شده از وسایل دیگر می‌باشد به عبارت دیگر، زمانی که وسیله شروع به ترمز گرفتن می‌کند وسیله پیرو اقدام به تخمین کاهش شتاب خود می‌کند و خطاهای عملکردی مرتبط به خطاهای پاسخ رانندگان به سبب کنترل نمودن مؤلفه‌های مکانیکی وسیله می‌باشد. صرف نظر از مؤلفه‌های مکانیکی، خطاهای عملکردی به دو مورد عملکرد کم تر^۹ و زیاد تر^{۱۰} از میزان متعادل، رفتار راننده نیویل، تقسیم‌بندی می‌گردد که به مقدار تغییر سرعت وسیله پیرو در فاز افزایش و کاهش شتاب بستگی دارند. مطابق شکل (۵-الف) وسیله نقلیه پیرو در فاز کاهش شتاب افت سرعت کم‌تری نسبت به مقدار مورد نیاز انجام بدهد، عمل عملکرد کم تر و مطابق شکل (۵-ب) اگر افت سرعت بیشتری نسبت به مقدار مورد نیاز بدهد عمل عملکرد زیادتر را انجام داده است.

در هر دو مورد عملکرد کم‌تر و زیادتر، مقدار تغییر سرعت منجر به انتشار دومین موج به جریان بالادست می‌شوند و مقدار سرعت مینم و وسیله پیرو کم‌تر از مقدار سرعت مینم می‌باشد.

مطابق شکل (۶) که مکانیزم عمل عملکرد کم‌تر و زیادتر را در فاز افزایش شتاب ارائه می‌دهد اگر راننده پیرو در فاز افزایش شتاب، افزایش شتاب کم‌تری نسبت به راننده نیویل انجام دهد عملکرد کم‌تر در فاز افزایش شتاب و اگر افزایش شتاب بیشتری نسبت به راننده نیویل انجام دهد عملکرد بیشتر در فاز افزایش شتاب را انجام داده است.

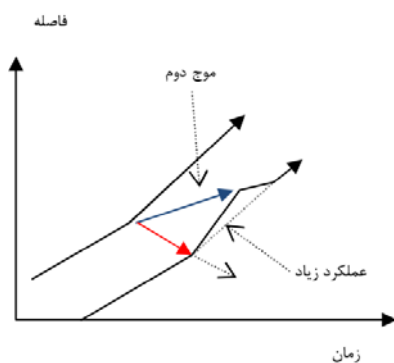


(الف)

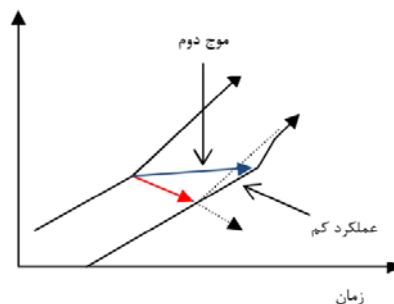


(ب)

شکل ۵- عملکرد کم تر و زیادتر از تعادل در فاز کاهش شتاب:
الف) عملکرد کمتر، ب) عملکرد زیادتر (Yeo, ۲۰۰۸)



فاصله



زمان

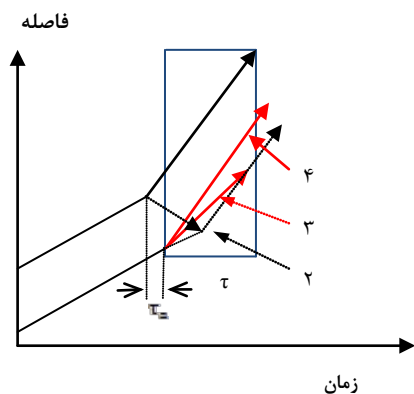
شکل ۶- عملکرد کمتر و زیادتر از تعادل در فاز افزایش شتاب
(Yeo, ۲۰۰۸)

5. Maneuvering errors
6. Anticipation
7. Perception
8. Estimation
9. Under reaction
10. Over reaction

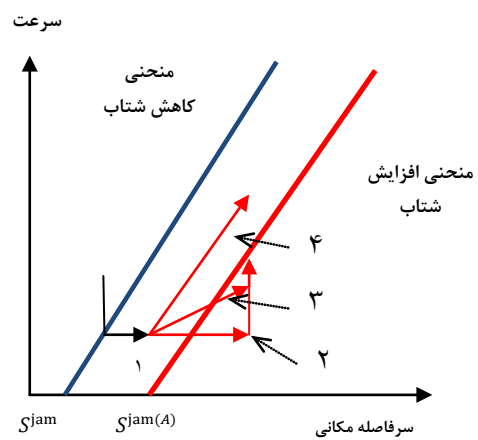
۵- موج پیش‌بینی^{۱۱}

تأثیر پیش‌بینی به زمان عکس‌العمل در تغییر احتمالی در پیش‌بینی ترافیک مرتبط می‌گردد. در اکثر مدل‌های تعقیب خودرو فرض می‌شود که رانندگان وسیله نقلیه تنها یک وسیله نقلیه را دنبال می‌کنند اما در ترافیک واقعی، رانندگان از اطلاعات عبوری چندین وسیله نقلیه در پایین‌دست و حتی خطوط جاده استفاده می‌کنند و حتی اگر پدیده ترافیکی در محل‌های خاصی به طور تناوبی تکرار شوند، رانندگان رفتار سرعت خود را به سبب آشنایی با محل تنظیم می‌کنند. Wanger (۱۹۹۸) مدل‌های وسیله نقلیه پیرو را پیشنهاد نمود که شامل چندین وسیله نقلیه می‌باشد و Treiber و همکاران (۲۰۰۶) اثرات پیش‌بینی را در فرموله نمودن مدل‌های وسیله نقلیه معرفی نمود. اگر راننده پیرو بتواند وضعیت ترافیک پایین‌دست را پیش‌بینی کند، در این سرفاصله مکانی ایمن را حفظ کند و اگر سرعت سریع‌تری در پایین‌دست جریان ترافیک مورد انتظار باشد، راننده پیرو توانایی افزایش شتاب زودتری را خواهد داشت. شکل‌های (۷) و (۸) اثر پیش‌بینی افزایش و کاهش شتاب را نشان می‌دهند. مطابق شکل (۷-الف)، τ_a : زمان عملکرد وسیله نقلیه پیرو بعد از تغییر وضعیت وسیله پیشرو، τ_a : زمان مدت پیش‌بینی در فاز افزایش شتاب می‌باشد. مطابق شکل (۷-ب)، اگر وضعیت ترافیکی فعلی در نقطه یک در نمودار سرعت-سرفاصله مکانی باشد، راننده می‌تواند تغییر وضعیت خود را وابسته به زمان پیش‌بینی، d ، τ تعیین کند. در وضعیت ترافیک بدون پیش‌بینی، $\tau_a = 0$ ، وسیله نقلیه مسیر شماره دو و برای $\tau_a > 0$ ، وسیله نقلیه مسیر شماره سه را دنبال می‌کند. در تخلیه گلوگاه در وضعیت جریان آزاد در محل پایین‌دست، راننده (پرخاشگر یا سریع^{۱۲}) مسیر شماره چهار را دنبال می‌کند که بین دو منحنی A و D در حال حرکت می‌باشد. همچنین مطابق شکل (۸) می‌توان مکانیزمی مشابه در مورد فاز کاهش شتاب ارائه نمود.

شکل (۹) مسیر عبوری چندین وسیله نقلیه را در حال حرکت کردن سرعت نشان می‌دهد که علامت دایره، بیانگر نقاط کاهش سرعت و علامت مثبت، نقاط افزایش سرعت و نواحی بدون علامت متعلق به حرکت با سرعت ثابت می‌باشند. مطابق شکل (۹)، وسیله نقلیه شماره دو تقریباً در زمانی مشابه با وسیله شماره یک کاهش شتاب می‌دهد که این هم‌زمانی کاهش شتاب بین وسیله شماره یک و دو را فقط به سبب موج پیش‌بینی می‌توان بیان نمود و مطابق شکل بین وسیله شماره دو و سه موج پیش‌بینی وجود ندارد و وسیله شماره سه بعد از وسیله شماره دو وارد فاز کاهش شتاب می‌شود.

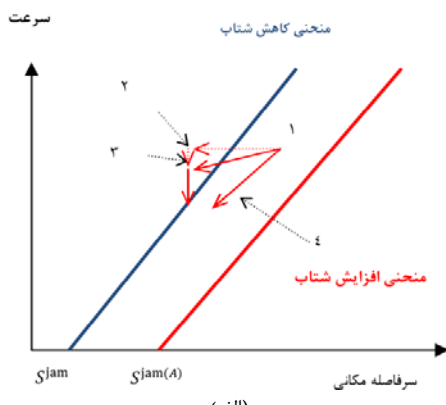


(الف)



(ب)

شکل ۷- اثر پیش‌بینی در فاز افزایش شتاب: (الف) مسیرهای عبوری وسیله نقلیه نمودار مکان- زمان، (ب) موج پیش‌بینی در نمودار سرفاصله مکانی- سرعت (Yeo, ۲۰۰۸)

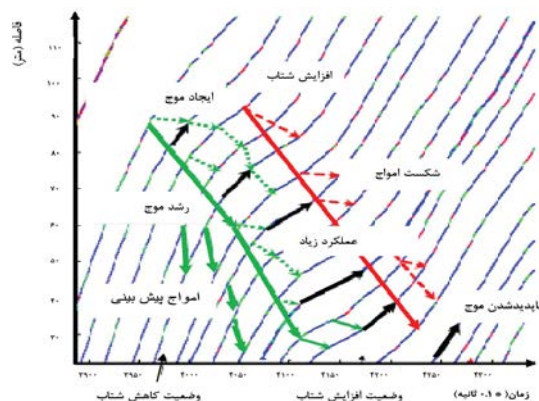


(الف)

شکل ۸- اثر پیش‌بینی در فاز کاهش شتاب: (الف) مسیرهای عبوری وسیله نقلیه نمودار مکان- زمان، (ب) موج پیش‌بینی در نمودار سرفاصله مکانی- سرعت (Yeo, ۲۰۰۸)

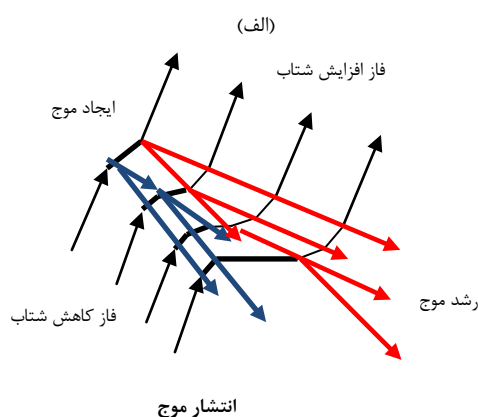
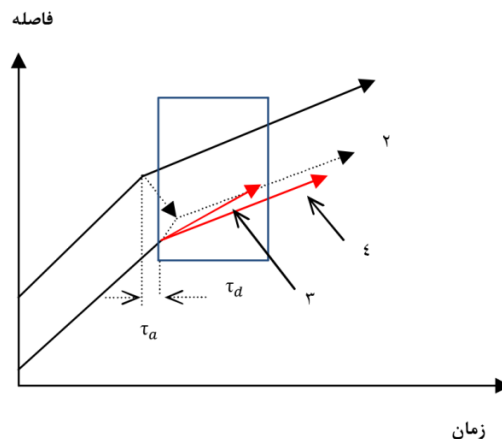
11. Anticipation
12. Aggressive

ترافیک با جریان آزاد یا وضعیت نزدیک منحنی A (منحنی A شامل فاز کرانه‌ای و فاز افزایش شتاب) مواجه گردد به دلیل این که وسایل نقلیه سرفاصله مکانی کافی برای جذب نمودن اثر موج حرکت- توقف را دارند، موج حرکت- توقف در جریان بالادست ناپدید می‌شود.

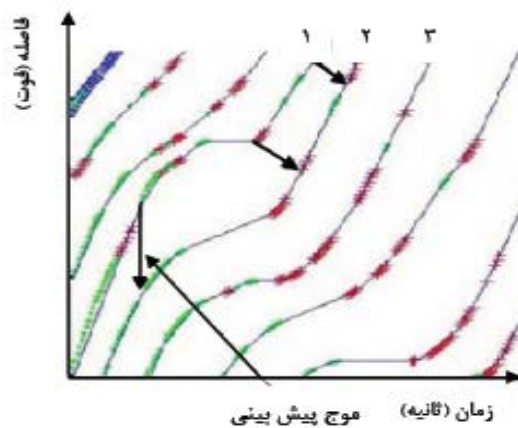


(ب)

شکل ۸- (ادامه)



(ب)



شکل ۹- موج پیش‌بینی در نمودار فاصله- زمان (Yeo, ۲۰۰۸)

شکل ۱۰- مکانیزم انتشار و ناپدید شدن موج در ترافیک حرکت- توقف: الف) حلقه عمر موج شوک، ب) ناپدید شدن اثر کاهش موج (Yeo, ۲۰۰۸)

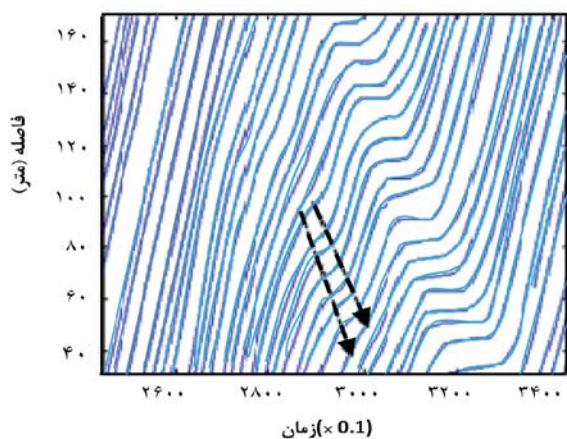
۶- تحلیل نتایج

۶-۱- تئوری ترافیک حرکت- توقف

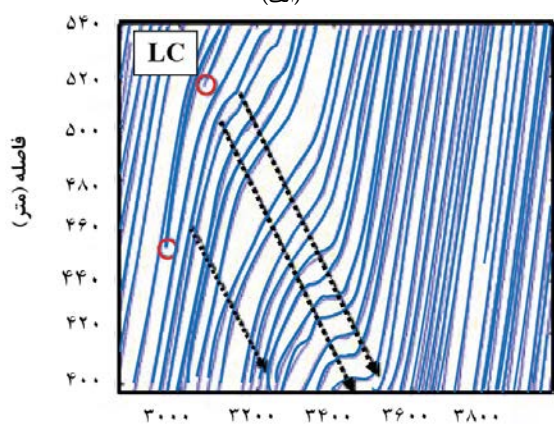
سؤالات اصلی تحقیق را می‌توان وابسته به حلقه عمر ترافیک حرکت- توقف بیان نمود که منجر به درک نمودن موارد ایجاد، رشد و ناپدید شدن امواج حرکت- توقف می‌گردد. در شکل (۱۰) مسیرهای وسیله نقلیه را در حال توضیح دادن سه مورد موج حلقه عمر مورد موج حلقه عمر حرکت- توقف را مبتنی بر تئوری نامتقارنی ارائه می‌گردد. ترافیک حرکت- توقف نزدیک منحنی D (منحنی D شامل دو فاز کرانه‌ای و کاهش شتاب) شروع و یا در حال کاهش شتاب به دلیل سرعت کم جریان پایین دست می‌باشد. در وضعیت D که وسایل نقلیه در سرفاصله مکانی کم رانندگی می‌کنند، آشفتنگی کوچک می‌تواند باعث انتشار افت سرعت‌های متوالی به جریان بالادست شود و تا زمانی که ترافیک بالادست پیرو مجاور منحنی D باشد، اثر موج حرکت- توقف رشد و به بالادست منتشر می‌شود. اگر موج

۶-۲- ایجاد موج

ناپایداری ترافیک مجاور منحنی D در ترافیک ازدحام شده و همچنین مانورهای تغییر خط سبب ایجاد امواج حرکت- توقف می‌گردند. مطابق شکل (۱۱) ناپایداری ایجاد شده، کاهش سرفاصله مکانی، از ترافیک حرکت- توقف نسبتاً کوچک هستند و نمی‌تواند باعث انتشار به جریان بالادست شوند مگر این که ترافیک پیرو مجاور منحنی D باشد اما ناپایداری ایجاد شده از تغییر خط زیاد است و می‌تواند به جریان بالادست انتشار یابد حتی اگر ترافیک پیرو مجاور منحنی D نباشد. به این دلیل امواج حرکت- توقف معمولاً در مجاورت نواحی ورودی و خروجی رمپ‌ها مشاهده و ایجاد می‌شوند.



(الف)

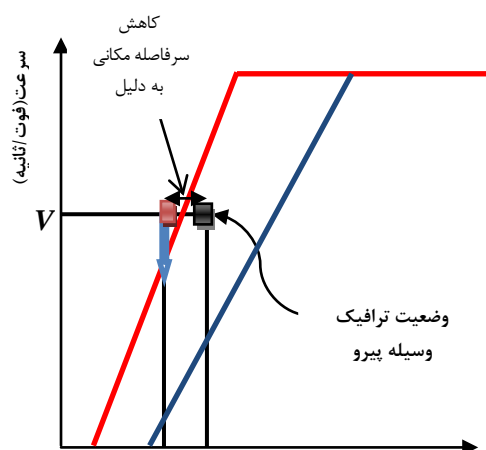


(ب)

شکل ۱۲- ایجاد شدن امواج ترافیک حرکت- توقف (دایره‌ها) نشان دهنده وارد شدن تغییرات خط: (الف) امواج ایجاد شده به سبب ناپایداری، (ب) امواج ایجاد شده به سبب تغییرات خط (Yeo, ۲۰۰۸)

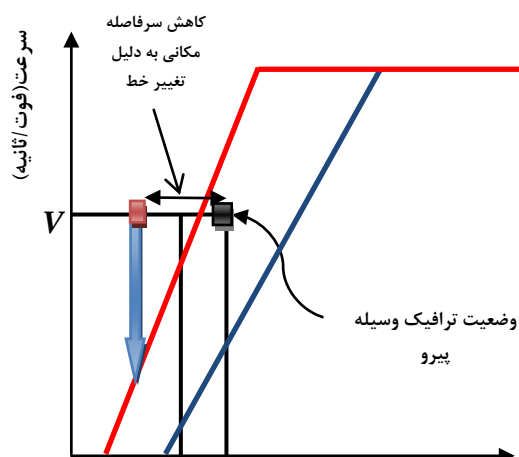
۳-۶- رشد موج

مکانیزم رشد موج مشابه ایجاد موج می‌باشد به عبارت دیگر زمانیکه وضعیت ترافیک مجاور منحنی D باشد آشفتگی کوچک می‌تواند به بالادست منتشر و تقویت گردد درحالی که با اثر پیش‌بینی و عملگر زیاد تر از تعادل ترکیب شده باشد. ویژگی‌های مورد رشد موج را می‌توان افت سرعت مینم، گسترش دوره زمان مؤثر و امواج پیش‌بینی در حال جریان بیان نمود. شکل (۱۳- الف) مسیره‌های وضعیت رشد موج و شکل (۱۳- ب) نمونه‌ای از مسیره‌های اندازه‌گیری شده از داده‌های NGSIM را نشان می‌دهد. ^{۱۳}TD، مسیره‌های مورد انتظار منحنی D را وضعیت منحنی D، سرفاصله مکانی کم، و ^{۱۴}TA مسیره‌های مورد انتظار منحنی A، سرفاصله مکانی کافی، را نشان می‌دهند،



سرفاصله مکانی (فوت)

(الف)



سرفاصله مکانی (فوت)

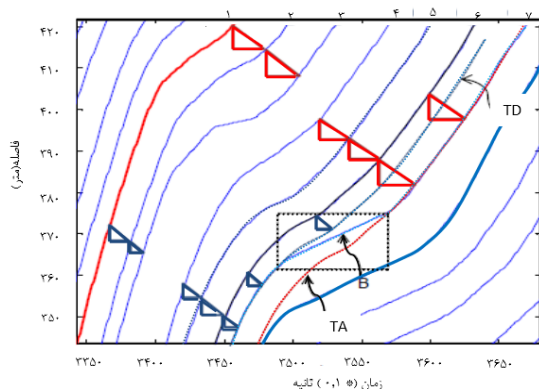
(ب)

شکل ۱۱- ایجاد موج حرکت- توقف، ناپایداری ترافیک و تغییر خط: (الف) ایجاد موج به دلیل ناپایداری ترافیک، (ب) ایجاد موج به دلیل تغییر خط (Yeo, ۲۰۰۸)

شکل (۱۲- الف) نمونه‌ای از ایجاد موج حرکت- توقف را نشان می‌دهد که به وسیله ناپایداری در ازدحام ایجاد شده است و امواج ایجاد شده اثر و عمر کمی دارند. مطابق شکل (۱۲- ب) که ایجاد امواج حرکت- توقف به دلیل تغییر خط را نشان می‌دهد، وسیله نقلیه پیرو مجبور به کاهش شتاب می‌شود تا سرفاصله کافی را به دلیل وسیله تغییر خط دهنده تأمین نماید.

13. D-curve trajectory
14. A-curve trajectory

تواند وارد فاز افزایش شتاب شود همچنین اگر به دلیل خطاهای عملکردی، وسیله نقلیه پیرو بیش از حد مورد نیاز کاهش سرعت، زیاد شدن بیش از حد مورد نیاز سرفاصله مکانی، بدهد موج افزایش شتاب معمولاً از موج C به موج b به تأخیر می‌افتد. مطابق شکل (۱۳- الف) زمانی که سرعت مینیموم بیشتر کاهش می‌یابد. وسیله پیرو برای دستیابی به منحنی افزایش شتاب، زمان بیشتری را طی می‌کند که منجر به تأخیر افتادن موج C نسبت به موج B می‌شود. اگر میدان دید راننده محدود نباشد راننده به دلیل پیش‌بینی ممکن است زودتر وارد فاز کاهش شتاب شود. به عبارت دیگر به دلیل موج پیش‌بینی، موج D، وسیله نقلیه پیرو قبل از ملاقات موج A وارد فاز کاهش شتاب می‌شود. بنابر این رشد موج حرکت- توقف فرآیندی است که به سه پارامتر پیش‌بینی، نزدیکی به منحنی D و رفتار وسیله پیرو وابسته می‌شود. مطابق شکل (۱۴) که نمونه‌ای از مسیرها در مورد رشد ترافیک حرکت- توقف را ارائه می‌دهد، وسیله شماره هفت با سرفاصله مکانی کم، مثلث‌های کوچک، که زمان عکس- العمل و سرفاصله مکانی اشباع را ارائه می‌دهند در حال نزدیک شدن به ترافیک حرکت- توقف می‌باشد. وسیله نقلیه شماره هفت ابتدا مسیر TD را دنبال می‌کند که با مثلث‌های کوچک نشان داده شده است و بعد از عبور کردن موج حرکت- توقف، مسیر TA را دنبال می‌کند و مسیرها در محیط بسته، نشان دهنده ناحیه انتقال از وضعیت D به A می‌باشد که بیانگر تطابق ویژگی‌های ارائه شده در تئوری نامتقارنی می‌باشد.

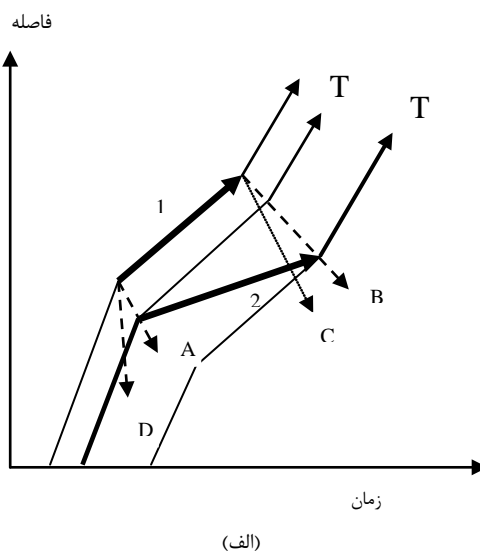


شکل ۱۴- رشد ترافیک حرکت- توقف (Yeo, ۲۰۰۸)

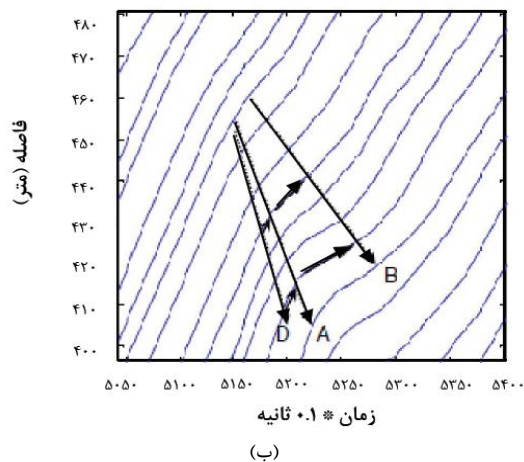
۴-۶- ناپدید شدن موج

وضعیت ترافیک مجاور منحنی A یا جریان آزاد به دلیل کافی بودن سرفاصله مکانی، اثر موج حرکت- توقف را می‌تواند جذب کند. مطابق شکل (۱۵- الف) اگر کاهش سرفاصله مکانی به دلیل ترافیک حرکت- توقف کم‌تر از فاصله تا منحنی D باشد، اثر کاهش سرفاصله مکانی کاهش یا کاملاً حذف و منجر به ناپدید شدن موج حرکت- توقف در زنجیر ترافیک ناپدید

زمانی که راننده در ادامه حرکت مسیر مورد انتظار خود را حفظ کند. در مورد رشد موج به دلیل این که تغییر وضعیت ترافیک از منحنی A به D انتقال می‌یابد منجر به کاهش سرعت مینیمم وسیله پیرو در مقایسه با سرعت مینیمم وسیله پیشرو و تأخیر افتادن موج افزایش شتاب از C به B می‌شود.



(الف)

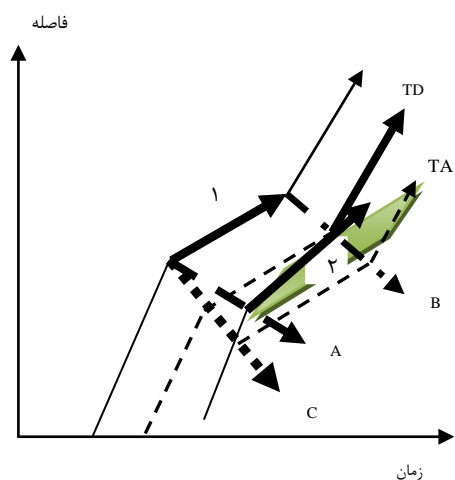


(ب)

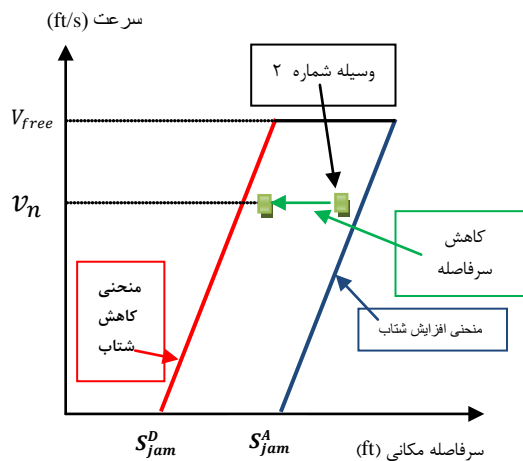
شکل ۱۳- رشد ترافیک حرکت- توقف: شکل الف) مکانیزم رشد: ب) نمونه‌ای از رشد ترافیک حرکت- توقف مبتنی بر (Yeo, ۲۰۰۸) NGSIM

دوره انتقال از منحنی D به منحنی A بستگی به سرعت مینیمم دارد به عبارت دیگر، هر چه وسیله پیرو نزدیک‌تر به منحنی D باشد برای رسیدن به منحنی TA مجبور به کاهش سرعت بیشتری می‌باشد و در نتیجه مطابق شکل (۱۳- ب) هر چه وسیله پیرو کاهش سرعت بیشتری بدهد زمان انتقال از منحنی D به A کمتر می‌شود. به دلیل کاهش سرعت بیشتر، سرفاصله مکانی بیشتری تأمین می‌شود و راننده پیرو سریع‌تر می‌

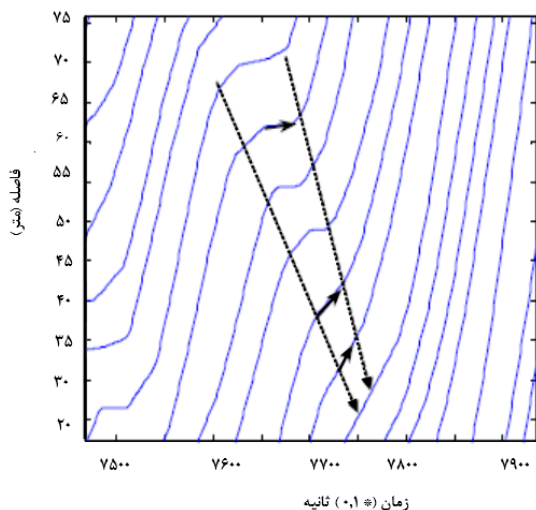
می‌شود. مطابق شکل (۱۵-ب) وسیله شماره دو به دلیل سرفاصله مکانی کافی، اثر موج یا کاهش سرفاصله را جذب کند و مانع از انتشار امواج به جریان بالادست می‌شود.



(الف)



(الف)

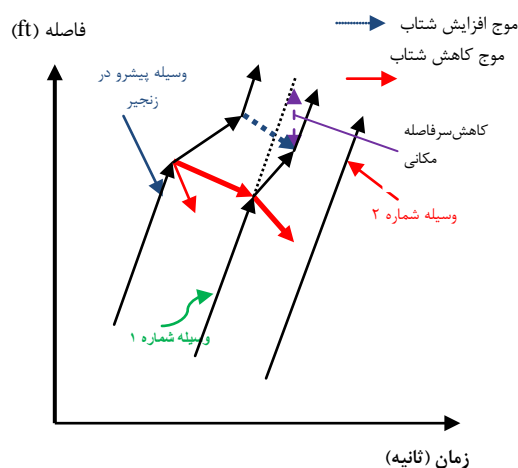


(ب)

شکل ۱۶- ناپدید شدن امواج حرکت- توقف: الف) مکانیزم ناپدید شدن موج، ب) نمونه‌ای از داده‌های NGSIM (Yeo, 2008)

مطابق شکل (۱۶-الف) کاهش یافتن اثر موج، کاهش کم تر سرفاصله مکانی، منجر به بازیابی سرعت مینیموم می‌شود و موج کاهش شتاب در مدت فاز کرانه‌ای انتقال از منحنی A به D می‌تواند از موج C به A به تأخیر بیفتد. در حالی که موج A عبور می‌کند، راننده به سبب تأمین کافی سرفاصله مکانی می‌تواند مطابق ناحیه هاشور خورده مقدار کاهش شتاب را انتخاب نماید و در زمان عبور موج B در حالی که با پیش‌بینی وضعیت ترافیک پایین‌دست ترکیب شده است راننده می‌تواند زمان و مقدار فاز افزایش شتاب را انتخاب نماید.

مطابق شکل (۱۷-الف) که تغییرات فاز در مدت مورد ناپدید شدن موج را نشان می‌دهد، در زمانی که امواج حرکت-توقف عبور می‌کنند فازهای ترافیکی از مجاورت منحنی A (مثلث‌های بزرگ) به منحنی D (مثلث‌های کوچک) انتقال

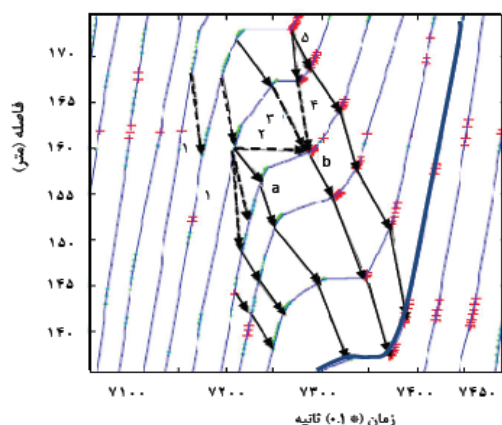


(ب)

شکل ۱۵- ناپدید شدن ترافیک حرکت- توقف: الف) وضعیت ناپدید شدن در نمودار سرعت- سرفاصله مکانی، ب) ناپدید شدن ترافیک حرکت- توقف با کاهش شتاب ناپیوسته در نمودار زمان- فاصله (Yeo, 2008)

بعد از جذب شدن امواج حرکت- توقف، وضعیت ترافیک نزدیک به منحنی D حرکت می‌کنند و در حالی که با یک موج حرکت-توقف بعدی برخورد کند، موج به آسانی تقسیم می‌شود و بعد از عبور موج، وضعیت ترافیک مجدداً به منحنی A انتقال می‌یابد و حتی اگر وسیله نقلیه جلویی موجود و یا تغییر خط دهد به ادامه مسیر در نزدیکی منحنی A ادامه حرکت می‌دهد. ویژگی‌های مورد ناپدید شدن موج را می‌توان سه پارامتر بازیابی سرعت مینیموم، کاهش دوره مدت مؤثر و ناپدید شدن موج بیان نمود.

کاهش شتاب وسیله شماره دو را به وسیله دو موج پیش‌بینی، موج خط چین، و افت سرعت اولیه را شروع و نهایتاً در نقطه a اقدام به افت سرعت نهایی و وارد فاز کاهش شتاب می‌شود و در ادامه حرکت زنجیر، دو موج پیش‌بینی به موج‌های کاهش شتاب تبدیل و منجر به افت سرعت در زنجیر، مورد رشد موج کاهش شتاب، می‌شود.



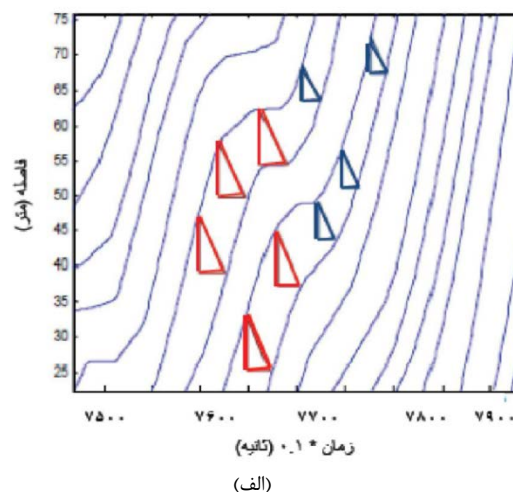
شکل ۱۸- کنش و واکنش ترافیک حرکت - توقف (Yeo, 2008)

موج دوم کاهش شتاب منتشر شده از وسیله شماره یک به سبب همگرا شدن موج کاهش و افزایش شتاب در نقطه b ناپدید و منجر به افزایش شتاب وسیله شماره سه در نقطه b می‌شود. موج منتشر شده افزایش شتاب وسیله شماره یک، موج شماره پنج، به دو موج افزایش شتاب شکسته و به بالادست منتشر می‌شود که موج افزایش شتاب اول از طریق موج پیش‌بینی شماره چهار توسط وسیله شماره سه در نقطه b دریافت و در ادامه مسیر منتشر می‌شود و همچنین موج دوم افزایش شتاب در ادامه زنجیر گسترش می‌یابد.

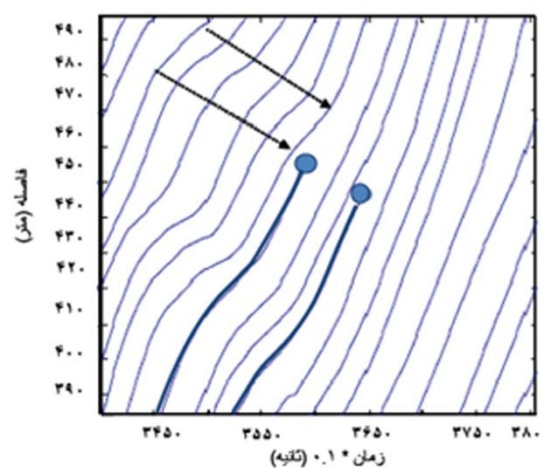
۷- نتیجه‌گیری

با استفاده نمودن از تئوری‌های ترافیک الهام گرفته از قوانین علم فیزیک نمی‌توان تحلیل دقیقی از پیچیدگی رفتار راننده در ترافیک حرکت-توقف ارائه نمود و همچنین در مدل‌های وسیله نقلیه پیرو به سبب فراوانی پارامترها نمی‌توان به سادگی ارتباط بین پارامترها و مشاهدات واقعی را برقرار نمود. در این مقاله مبتنی بر تئوری نامتقارنی در فاز افزایش و کاهش شتاب و داده‌های عبوری NGSIM، حرکت و رفتار پیچیده پاسخ‌های مختلف راننده و همچنین مکانیزم ترافیک حرکت-توقف مطابق با حلقه عمر ترافیک حرکت-توقف آنالیز می‌گردد. به منظور درک نمودن محدودیت‌های تئوری‌های موجود، تئوری ترافیک

می‌یابند که سرفاصله مکانی کوچک و زمان سفر موج کم‌تری دارند. همان‌طور که تغییرات خط ورودی سبب مورد رشد امواج حرکت-توقف می‌شوند، مطابق شکل (۱۷-ب) تغییرات خروجی خط سبب افزایش سرفاصله مکانی می‌شوند که می‌تواند اثر موج را جذب کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- ناپدید شدن موج حرکت-توقف (Yeo, 2008)

۶-۵- کنش و واکنش ترافیک حرکت-توقف

مطابق شکل (۱۸) ترافیک حرکت-توقف شامل چندین موج، موج پیش‌بینی، موج کاهش و افزایش شتاب و دومین موج شکسته شده از امواج دیگر می‌شود و برخورد امواج مشابه باعث تقویت اثر امواج می‌شود. در شکل (۱۸) علامت مثبت نشانه نقطه افزایش شتاب و علامت منفی نشانه نقطه کاهش شتاب می‌باشد. افت سرعت وسیله شماره یک در دو مرحله منجر به انتشار دو موج کاهش شتاب به جریان بالادست می‌شود از طرف دیگر وسیله شماره سه در دو مرحله شروع فاز

- Transportation Research Part A, 2008, 42 (8), 1098-1108.
- Daganzo CF, "Fundamentals of transportation and traffic operations", Pergamon, 1997.
- Daganzo CF, "In traffic flow, cellular automata kinematic waves", Transportation Research Part B, 2006, 40, 396-403.
- Del Castillo JM, "Propagation of perturbations in dense traffic flow: A model and its implications", Transportation Research Part B, 2001, 35, 367-389.
- Edie LC, "Discussion of traffic upstream measurements and definitions", The 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, London, UK, 1965, 139-154.
- Foote RS, "Single Lane Traffic Flow Control", The 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow", London, 1965, 84-103.
- Forbes TW, "Human factor consideration in traffic flow theory", Highway Research Record, 1963, 15, 60-66.
- Gipps PG, "A behavioural car-following model for computer simulation", Transportation Research Part B, 1981, 15, 106-111.
- Jonghae S, Hwasoo Y, Alexander S, "A study on the wave development and evolution characteristics of stop-and-go traffic", The 91th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington DC, US, January, 2012.
- Kerner BS, Rehborn H, "Experimental features and characteristics of traffic jams", Physical Review E, 1996, 53, 1297-1300.
- Kerner BS, Rehborn H, "Theory of congested traffic flow: self organization without bottlenecks", The 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, New York, US, 1999, 147-171.
- Kerner B, "Three-phase traffic theory and highway capacity", Physica A, 2004, 333, 379-440.
- Kim T, Zhang HM, "Gap time and stochastic wave propagation", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2004, 88-93.
- Koshi M, Kuwahara M, Akahane H, "Capacity of sags and tunnels in Japanese motorways", ITE Journal, 1992, 17-22.
- Laval JA, "Linking synchronized flow and kinematic wave theory", Traffic and Granular Flow '05, 2005, 521-526.
- Laval JA, "Stochastic processes of moving bottlenecks: approximate formulas for highway capacity", Transportation Research Record, 2006, 86-91.
- Laval JA, Daganzo CF, "Lane-changing in traffic streams", Transportation Research Part B, 2006, 40 (3), 251-264.
- Laval JA, Leclercq L, "A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic", Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2010, 4519-4541.
- Lighthill MJ, Whitham GB, "On kinematic waves: II. A theory of traffic flow on long crowded roads", Proceedings of the Royal Society, London, Ser. A 229 1178, 1955, 317-345
- Nagel K, Nelson P, "A critical comparison of the kinematic wave model with observational data",

نامتقارنی در سطح جزئی‌نگر جریان ترافیک به پنج فاز، جریان آزاد، فاز افزایش شتاب، فاز کاهش شتاب، کرانه‌ای و پایدار تقسیم‌بندی می‌گردد که تعادل ترافیکی محدود به دو منحنی افزایش و کاهش شتاب، منحنی A، D، می‌شود. آنالیز دو الگوی مشاهده شده متداول در رفتار رانندگی، خطاهای عملکردی و پیش‌بینی، مبتنی بر تئوری نامتقارنی نشان می‌دهد که خطاهای عملکردی وسیله نقلیه پیرو به دو مورد عملکرد زیادتر و کم‌تر در هر دو فاز کاهش و افزایش شتاب تقسیم می‌شوند. به عبارت دیگر در فاز کاهش شتاب اگر وسیله نقلیه پیرو افت سرعت کم‌تری نسبت به راننده متعادل، راننده Newell، انجام بدهد، عمل عملکرد کمتر و اگر افت سرعت بیشتری نسبت به راننده متعادل بدهد عمل عملکرد زیاد را انجام داده است. در هر دو عملکرد کمتر و بیشتر مقدار تغییر سرعت، منجر به انتشار دومین موج به جریان بالادست می‌شوند و مقدار سرعت مینیمم وسیله پیرو کمتر از مقدار سرعت مینیموم سرعت وسیله پیشرو می‌باشد. مکانیزم عملکرد کمتر و بیشتر در فاز افزایش شتاب، مشابه فاز کاهش شتاب می‌باشد، همچنین مبتنی بر تئوری نامتقارنی سیکل موج ترافیک حرکت-توقف به سه مورد ایجاد، رشد و ناپدید شدن موج تقسیم‌بندی می‌گردد. نتایج تحلیل نشان می‌دهند زمانی که ترافیک حرکت-توقف در مجاورت منحنی D، در حال کاهش شتاب داددن یا در آستانه کاهش شتاب، ایجاد شود و وسایل نقلیه در سرفاصله مکانی کم رانندگی می‌کنند یک آشفتنگی کوچک منجر به منتشر افت سرعت به ترافیک بالادست شود و تا زمانی که ترافیک عبوری در مجاورت منحنی D باشد موج ترافیک حرکت-توقف به بالادست منتشر می‌گردد و پیوستگی افت سرعت ادامه می‌یابد تا زمانی که موج ترافیک عبوری به منحنی A، افزایش شتاب یا در آستانه شتاب، برسد. زمانی که ترافیک عبوری در مجاورت منحنی A حرکت می‌کند به سبب کافی بودن سرفاصله مکانی اثر موج حرکت-توقف جذب می‌گردد به عبارت دیگر ترافیک عبوری به سمت منحنی D متمایل می‌گردد و افت سرعت می‌دهد اما کافی بودن سرفاصله مکانی مانع از توقف ترافیک می‌گردد و ترافیک عبوری مجدداً افزایش سرعت می‌دهد.

۸- مراجع

- Ahn S, Cassidy M, "Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers", 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, New York, US, 2007.
- Banks J, "Two-capacity phenomenon at freeway bottlenecks: A basis for ramp metering", Transportation Research Record, 1991, 83-90.
- Bilbao-Ubillos J, "The costs of urban congestion: estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link road",

- Yeo H, Skabardonis A, "Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory", *Transportation and Traffic Theory*, 2009, 99-115.
- Zheng Z, Ahn S, Chen D, Laval J, "Applications of wavelet transform for analysis of freeway traffic: bottlenecks, transient traffic, and traffic oscillations", *Transportation Research Part B*, 2011a, 45 (2), 372-384.
- Zheng Z, Ahn S, Chen D, Laval J, "Freeway traffic oscillations: microscopic analysis of formations and propagations using wavelet transform", *The 19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 2010.
- Zheng Z, Ahn S, Chen D, Laval JA, "Freeway traffic oscillations: microscopic analysis of formations and propagations using wavelet transform", *The 19th International Symposium on Transportation and Traffic flow Theory*, 2011b, 717-731.
- Zielke BA, Bertini RL, Treiber M, "Empirical measurement of freeway oscillation characteristics: an international comparison", *Transportation Research Record*, 2008, 57-67.
- The 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 2005, 145-163.
- Newell GF, "A simplified car-following theory: a lower order model", *Transportation Research Part B*, 2002, 36, 196-205.
- Richards PI, "Shock waves on the highway", *Operations Research*, 1956, 4, 42-51.
- Treiber M, Kesting A, Helbing D, "Understanding widely scattered traffic flows, the capacity drop, and platoons as effects of variance-driven time gaps", *Physical Review E*, 2006, 74, 116-123.
- Trigs T, Harris W, "Reaction time of drivers to road stimuli", *Department of Psychology, Monash University, Australia*, 1982.
- Wagner C, "Asymptotic solutions for a multi-anticipative car-following model", *Physica A*, 1998, 218-224.
- Yeo H, "Asymmetric microscopic driving behavior theory", *PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, US*, 2008.

EXTENDED ABSTRACT

Identifying Stop and Go Traffic in Trajectory of Vehicle Platoon Based on Asymmetric Theory

Ali Abdi^{a,*}, Arsalan Salehikalam^b, Mahmood Saffarzadeh^c, Gholamreza Mehdizadeh^d

^a Faculty of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^b Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^c Civil Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

^d Payam-e-Noor University, Tehran, Iran

Received: 31 December 2015; **Accepted:** 02 July 2016

Keywords:

Life cycle stop and go traffic, Asymmetric theory, Driver's behavior responses, trajectory data of NGSIM

1. Introduction

Analyzing stop and go traffic that observes unexpected reasons on freeways is important for modeling generation and growth oscillation and estimate congestion effects on traffic flow. Numerous theories on traffic have been developed as traffic congestion gains to model congestion traffic, many traffic theorists have adopted theories from other fields such as fluid mechanics and thermodynamics. However, these theories cannot explain the complicated driving behavior patterns from the fluid mechanics' perspective. In these paper, because stop and go traffic identify at a microscopic level and based on asymmetric theory and trajectory data of NGSIM, traffic flow state can be classified into five phases according to speed and movement of the vehicle: Free flow, acceleration, deceleration, stationary and coasting phases and also, traffic flow departs between boundaries of acceleration and deceleration phases. Based on asymmetric theory can analyze driver's behavior responses: maneuvering errors and anticipation, and also life cycle of stop-and-go Traffic can demonstrate three cases: Generation, Growth, Dissipation.

2. Methodology

2.1. Phasing traffic flow based on asymmetric theory

Based on asymmetric theory, traffic flow has five different phases: acceleration, deceleration, stationary, free-flow and coasting. In free flow, drivers run at their desired speed which is usually a maximum speed. Acceleration phase is a state in which a vehicle is speeding up to catch up with the speed of the leader vehicle or reduce spacing. In deceleration phase a vehicle is braking to reduce its speed or to increase spacing from the lead vehicle. In stationary phase, vehicles keep constant both their speed and spacing. Coasting is defined as a phase in which a vehicle keeps its speed but spacing is being reduced or enlarged by the lead vehicle's deceleration or acceleration between A/D curve. During coasting phase, a vehicle will not do any action as long as it is between the two curves. Reaching A or D-curve, it will start acceleration or deceleration phase. Coasting is actually a transition phase connecting deceleration and acceleration. In microscopic view, stationary phase is a traffic state in which the speed and spacing between two adjacent vehicles are constant. But, in traffic situation it is almost impossible for these two values to be kept constant for long time because human perception and reaction are not perfect. So, we need a relaxed definition for stationary phase. Near-stationary flow can be defined in speed-spacing plane when the following conditions are satisfied:

* Corresponding Author

E-mail addresses: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir (Ali Abdi), salehikalam.arsalan@gmail.com (Arsalan Salehikalm), saffar_m@modares.ac.ir (Mahmood Saffarzadeh), smehdizadeh31@yahoo.com (Gholamreza Mehdizadeh).

$$\left| \frac{ds_n}{dt} \right| \leq TH_s, \quad \left| \frac{dv_n}{dt} \right| \leq TH_v \quad (1)$$

2.2. Shock waves

2.2.1. Reaction time vs. wave travel time

Based on searches, the human reaction time to front stimulus is different from the actual response time which is measured from front speed change to the follower's speed change on the road. Kim and Zhang (2004) called this reaction time as 'biological reaction time', and wave travel time as actual reaction time. Figure 8 shows measured reaction time in car-following for deceleration situation. The time gaps between the lead vehicle's braking signal and follower's signal were measured. It shows a distribution which ranges from 0.5 sec~1.6 sec. Most of them (80%) are within 0.6 sec~1.3 sec. This distribution shows good match with real human reaction time. If a lead vehicle started decelerating at time t_1 and the subject vehicle started at time t_2 , the wave travel time τ is $t_2 - t_1$, if all of the following conditions are satisfied:

- The subject vehicle's speed must be less than free flow speed
- Both vehicles must travel at a constant speed before the action
- Both vehicles must be traveling at the same speed before the leader vehicle's action

2.2.2. Shock wave speed based on asymmetric theory

Time of shock wave propagation depend on speed and spacing. According to figure 10, we assume two states A (s_1, v_1) and B (s_2, v_2) which are on different curve in speed-spacing plane.

$$d = V_2 t_w - S_2 \quad t_w = (S_2 - S_1) / (V_2 - V_1) \quad (2)$$

Therefore, wave speed w is two points is the y-intercept of the line connecting two points.

$$W = (V_2 t_w - S_2) / t_w = V_2 - S_2 \frac{(V_2 - V_1)}{(S_2 - S_1)} \quad (3)$$

2.3. Human driving behavior

2.3.1. Maneuvering errors

Drivers are not perfect in adjusting their speeds, because of perception, estimation and action errors. Perception errors include measurement errors for distance or speed of the vehicle in front.

2.3.2. Anticipation

The "anticipation effect" is related to the time of action on the possible change in future traffic. In most car-following models, it is assumed that drivers follow only one vehicle, but in the real world, drivers use information from several vehicles downstream and even from adjacent lanes.

3. Results and discussion

3.1. Stop and go traffic theory

The key research questions relate to the life-cycle of stop-and go traffic, i.e., the understanding and explanation of the generation, growth and dissipation of traffic waves. Stop-and-go is generated near D-state (D-state is a state in which a vehicle is near D-curve or is decelerating, so it includes stationary and coasting phase near D-curve, and deceleration phase) in which traffic is decelerating or ready to decelerate because of the lower vehicle speeds downstream. In D-state, where vehicles drive in short spacing, a small disturbance can cause subsequent speed drops which may propagate upstream. As long as the upstream traffic is near D-state, the stopping wave of stop-and-go traffic grows and propagates upstream. This continues until the wave meets free flow traffic or vehicles ear A-state (A-state includes near A-curve stationary, coasting and acceleration phase), where vehicles have larger spacing which can absorb the stopping wave. When a vehicle in A-state meets a stopping wave, it will coast towards D-curve without braking, and then start deceleration according to speed difference. By delaying the braking event, the wave propagation is delayed and its speed decreases.

3.2. Generation

Stop-and-go waves can be generated in unstable traffic which is near D-curve in congested traffic; the instability invoked in stop-and-go traffic is relatively small and cannot be propagated upstream unless the following traffic is also near D-curve; while the effect by lane changes are greater, and can propagate even if the following traffic is not near the D-curve. This is the reason why stop-and-go waves are frequently observed to be formed near on-ramp merging areas. The location of stop-and-go traffic generation is expected to be close to lane changing locations. Also note that in Newell's theory, the deceleration path follows D-curve, while in the proposed one, it passes the D-curve first, and then moves down to the location on D-curve.

3.3. Growth

The mechanism of the growth is basically the same with the one of generation. Here, the focus is on the amplification of the waves. When the traffic state is near D-curve, a small disturbance can propagate and be amplified combined by over-reaction and anticipation effect as described in the previous section. There are some distinct phenomena in the growth phase, including a) drop of minimum speed (amplification), b) expansion of the affected time period, and c) fast running anticipation waves. Because a transition from D-curve to A-curve is required in growth stage before exiting stop-and-go waves, the minimum speed always drops compared to the minimum speed of the leader vehicle, and the acceleration wave is usually delayed. The transition period depends on the speed of the '2'- minimum speed.

3.4. Dissipation

When a vehicle's traffic state is near the A-curve or in free flow, it can absorb the impact of stop-and-go traffic. If the front spacing reduction by stop-and-go traffic is less than the distance to the D-curve, the impact of spacing reduction will be reduced or entirely eliminated. So, if the following traffic is near the A-curve, the stop-and-go traffic waves will dissipate. Keeping large spacing, vehicle '2' can absorb the spacing reduction impact, and all the waves stop to propagate. After absorbing the stop-and-go waves the vehicle will move closer to the D-curve state. Meeting another stop-and-go wave, it can easily breakdown. Inside congested traffic, A-curve traffic can be generated after passing a stop-and-go traffic. If a front vehicle exits or changes lane to other lane, the following vehicle can also be near in A-curve.

4. Conclusions

The objective of this research is to develop a new traffic theory, which can be used as a framework for developing improved microscopic traffic simulation models. Most of the existing traffic flow theories have been derived from physics laws and cannot explain complicated driving behavior especially in congested traffic. Existing car-following models incorporate numerous parameters that cannot be readily linked with field observations of driver behavior. The approach in this thesis is to analyze in detail the movement and interactions of individual vehicles in congested traffic based on field data on vehicle trajectories. The analysis provides experimental evidence on the asymmetry in vehicle acceleration and deceleration. A microscopic asymmetric traffic theory is then proposed that can be used to understand and model traffic phenomena. A microscopic asymmetric driving behavior theory is proposed based on detailed analysis of individual vehicle trajectories from the NGSIM database, which is the largest database of vehicle trajectories that exists to date. The findings clearly show the asymmetry in vehicle's acceleration and deceleration, and define five traffic phases: free flow, acceleration, deceleration, coasting, and stationary. The proposed theory suggests that equilibrium exists in the area bounded by A-curve and D-curve, and provides detailed description and mechanism of phase transitions. Extensions of the basic theory address common driver behavioral characteristics such as maneuvering error and anticipation. The application of the proposed theory provides reasonable and intuitive explanations verified with experimental data on common traffic phenomena, which cannot be satisfactorily addressed by existing macroscopic or microscopic theories.

5. References

Kim T, Zhang HM, "Gap time and stochastic wave propagation", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2004, 88-93.